

연구보고서

미래 전기에너지 변화 대응을 위한 산업현장의 전기사고 원인분석

변정환

산업재해예방

안전보건공단

산업안전보건연구원



요약문

- 연구기간 2024년 3월 ~ 2024년 11월
- 핵심단어 전기에너지, 사고사망, 발생원인, 개선방안
- 연구과제명 미래 전기에너지 변화 대응을 위한 산업현장의 전기사고 원인분석

1. 연구배경

신재생에너지 발전 증가세와 더불어 기존 설비 노후화에 따른 누전에 따른 감전 및 전기화재가 지속적으로 발생하고 있으며, 전기에너지 및 관련 설비 변화에 따라 새로운 위험요인의 발현이 예상됨에 따라 전기사고 원인분석을 통해 미래 전기에너지 변화에 효과적으로 대응하고자 한다.

따라서 재해조사 의견서에 대한 발생 원인의 재해석, 위험요인 재분류 및 개입 지점의 상세화를 통해 미래 전기에너지 변화에 따른 새로운 위험성을 안전한 수준으로 관리·통제할 수 있는 기술적·제도적 개선 방안을 제시하고자 한다.

2. 주요 연구내용

1) 전기에너지 관련 실태 파악 및 미래 산업구조 변화 분석

선행연구 분석 및 문헌 고찰 등을 통해 미래 전기에너지 관련 실태를 파악하고 그에 따른 미래 산업구조 변화를 분석하여 분석 결과에 따른 대응 방안을 모색하였다.

2) 전기재해 관련 발생유형 분류 및 원인분석

2013년부터 2022년까지 감전 관련 중대재해 조사의견서 186건을 분석하였다. 그리고 전기안전공사 전기재해통계와 비교 분석을 통해 시사점을 도출하였으며, 중대재해 조사의견서 분석결과에 대한 빈도분석, 유형화 및 교차분석 등을 통해 재해예방영역을 설정하고 법·제도 사각지대를 해소하고자 하였다.

3) 미래 전기에너지 변화 대응을 위한 개선과제 도출

미래 전기에너지 변화 분석을 통해 산업안전 측면에서의 위험성을 예측하고 위험성 관리 및 대응을 위한 개선과제를 도출하였다.

4) 전기에너지 사고사망 감소를 위한 개선방안 제시

감전 중대재해 조사의견서 분석 및 미래 전기에너지 변화 예측을 통해 현행 산업안전보건법 및 기준규칙 개선(안)을 제안하고 안전기술을 개발하였다. 그리고 미래 전기에너지 변화에 따른 전기작업 관련 위험성평가 및 안전작업 사전 검토 절차도 마련하였다.

3. 연구 활용방안

1) 기대효과

미래 전기에너지 변화에 따른 새로운 위험성을 안전한 수준으로 관리·통제할 수 있는 기술적·제도적 개선 방안을 제시하고, 전기에너지 관련 산업구조 및 공정·작업 변화에 대한 능동적 대응을 통해 산업안전 선진국 도약을 위한 사고사망 감축을 지원한다.

2) 활용방안

기술적·제도적 개선 방안 제시를 통해 산업안전보건법 등 제·개정 및 안전 기술 개발, 기술지침·매뉴얼 개발 등에 활용하고, 연구성과 환류를 위해 국내·외 학술대회 논문게재 및 발표, 특허출원에 활용한다.

4. 연락처

- 연구책임자 : 산업안전보건연구원 산업안전연구실 연구위원 변정환
 - ☎ 052) 703. 0843
 - E-mail bjh6918@kosha.or.kr

목 차

I. 서 론	1
1. 연구목적 및 필요성	3
2. 연구내용 및 방법	4
3. 선행연구	6
II. 산업현장 전기사고 발생원인	9
1. 배경	11
2. 산업현장 전기사고·재해 발생현황	14
1) 세계 주요국 감전 사망자수 비교	14
2) 전기안전공사 전기재해 통계	16
3. 감전 중대재해 조사의견서 분석	26
1) 감전 중대재해 발생 개요	26
2) 분석 대상 및 방법	30
3) 감전 매커니즘 기반 조사의견서 분석 모형	32
4) 분석결과	35
5) 감전 중대재해 Case Study	72

목 차

4. 소결	80
1) 중대재해 조사의견서 분석	80
2) 건설과 건설외의 감전 중대재해 발생현황 비교	81
Ⅲ. 미래 전기에너지 변화	83
1. 동향 분석	85
1) IEA의 세계 에너지 전망	85
2) 에너지 수요 전망	87
3) IEA의 2050 넷제로 로드맵(2023년)	94
4) 정부 정책	100
5) 언론보도	102
2. 위험 예측 및 대응	104
1) 직류전원 확대	104
2) 태양광·풍력 에너지저장장치 화재	105
3) 전기자동차	106
4) 해상풍력	111
5) 중·단기 에너지 안보 위험 요인	115

3. 소결	117
1) 신재생에너지 확대 보급	117
2) 분산형 에너지 시스템	117
3) 스마트 그리드와 IoT	117
4) 전기차(EV)와 에너지저장장치(ESS)	118
5) 에너지 효율성 향상	118
6) 정책 및 글로벌 협력	118
IV. 전기에너지 관련 법·제도, 기술 개선방안	119
1. 법·고시 사각지대	121
1) 중대재해 원인분석	121
2) 사각지대 발굴	122
3) 신재생에너지원 보급·사용 확대	144
2. 법·기준 개선사항	148
1) 산업안전보건법	148
2) 안전인증·안전검사·자율안전확인 고시	150

목 차

3. 전기안전 신기술 개발	151
1) 지락차단장치(RCD)	151
2) 직류 아크검출장치	161
4. 전기사고 예방을 위한 위험성평가 및 안전작업절차	168
1) 에너지저장장치(ESS) 위험성평가	168
2) 전기작업 허가 절차	168
V. 결론	171
1. 연구 내용 및 결과	173
1) 연구내용	173
2) 연구결과	174
2. 기대효과 및 활용방안	176
1) 기대효과	176
2) 활용방안	176
참고문헌	177
Abstract	179

표 목차

〈표 Ⅰ-1〉 선행연구 현황	6
〈표 Ⅱ-1〉 미국의 감전 사망자수 현황	14
〈표 Ⅱ-2〉 각국의 백만명당 감전 사망자수	15
〈표 Ⅱ-3〉 2022년 형태별 감전사고 발생현황	17
〈표 Ⅱ-4〉 2022년 직종별 감전사고 발생현황	18
〈표 Ⅱ-5〉 전기기술자 감전사고 발생현황	19
〈표 Ⅱ-6〉 생산직 종사자 감전사고 발생현황	19
〈표 Ⅱ-7〉 기계·설비직 감전사고 발생현황	19
〈표 Ⅱ-8〉 2022년 행위별 감전사고 발생현황	20
〈표 Ⅱ-9〉 2022년 전기설비별 감전사고 발생현황	23
〈표 Ⅱ-10〉 2022년 장소별 감전사고 발생현황	24
〈표 Ⅱ-11〉 인체 화상범위별 감전사고 발생현황	25
〈표 Ⅱ-12〉 인체 화상정도별 감전사고 발생현황	25
〈표 Ⅱ-13〉 최근 10년간 감전재해 발생현황	26
〈표 Ⅱ-14〉 최근 10년간 감전사고 사망자수 비중	28
〈표 Ⅱ-15〉 최근 10년간 감전사고 부상자수 비중	29
〈표 Ⅱ-16〉 분야별 감전 중대재해 발생현황	36
〈표 Ⅱ-17〉 도급 여부별 감전 중대재해 발생현황	36
〈표 Ⅱ-18〉 업종별 감전 중대재해 발생현황	37
〈표 Ⅱ-19〉 제조업 중업종별 감전 중대재해 발생현황	37

표 목차

〈표 II-20〉 건설업 도급인의 공사종류별 감전 중대재해 발생현황	38
〈표 II-21〉 건설업 도급인의 작업공종별 감전 중대재해 발생현황	38
〈표 II-22〉 건설업 수급인의 공사 종류별 감전 중대재해 발생현황	39
〈표 II-23〉 건설업 수급인의 전문업종별 감전 중대재해 발생현황	39
〈표 II-24〉 사업장별 감전 중대재해 발생현황	40
〈표 II-25〉 사업장 장소별 감전 중대재해 발생현황	40
〈표 II-26〉 사업장 (중)장소별 감전 중대재해 발생현황	41
〈표 II-27〉 공정별 감전 중대재해 발생현황	41
〈표 II-28〉 작업목적별 감전 중대재해 발생현황	42
〈표 II-29〉 작업계획별 감전 중대재해 발생현황	42
〈표 II-30〉 작업내용별 감전 중대재해 발생현황	43
〈표 II-31〉 작업위치별 감전 중대재해 발생현황	44
〈표 II-32〉 작업형태별 감전 중대재해 발생현황	45
〈표 II-33〉 작업자 직종별 감전 중대재해 발생현황	45
〈표 II-34〉 작업자 자격보유별 감전 중대재해 발생현황	45
〈표 II-35〉 발생형태별 감전 중대재해 발생현황	46
〈표 II-36〉 접촉형태별 감전 중대재해 발생현황	46
〈표 II-37〉 아크발생 여부별 감전 중대재해 발생현황	46
〈표 II-38〉 전원차단 여부별 감전 중대재해 발생현황	47
〈표 II-39〉 활선상태별 감전 중대재해 발생현황	47
〈표 II-40〉 기인물별 감전 중대재해 발생현황	48

〈표 II-41〉 기인물의 세부 충전부별 감전 중대재해 발생현황	48
〈표 II-42〉 충전부 발생원인별 감전 중대재해 발생현황	49
〈표 II-43〉 충전부 접촉사유별 감전 중대재해 발생현황	49
〈표 II-44〉 감전전압(크기)별 중대재해 발생현황	50
〈표 II-45〉 접촉전압별 감전 중대재해 발생현황	51
〈표 II-46〉 인체 통전형태별 감전 중대재해 발생현황	51
〈표 II-47〉 인체저항별 감전 중대재해 발생현황	51
〈표 II-48〉 통전경로별 감전 중대재해 발생현황	52
〈표 II-49〉 CPR 실시여부별 감전 중대재해 발생현황	53
〈표 II-50〉 사망시점별 감전 중대재해 발생현황	53
〈표 II-51〉 발견시점별 감전 중대재해 발생현황	53
〈표 II-52〉 구조시점별 감전 중대재해 발생현황	53
〈표 II-53〉 산업안전보건기준에 관한 규칙 위반 조항	54
〈표 III-1〉 세계 장기 에너지 전망 시나리오	87
〈표 III-2〉 시나리오별 총 최종에너지 소비부문 전망	88
〈표 III-3〉 에너지별 글로벌 발전량 구성 전망	90
〈표 III-4〉 에너지원별 수급 전망	92
〈표 III-5〉 발전량 및 발전비중(안)	101
〈표 III-6〉 기존 전력시스템과 분산에너지 시스템 비교	101
〈표 III-7〉 전기에너지 변화 관련 언론보도	102

표 목차

〈표 Ⅲ-8〉 전기자동차 정비작업 시 유해위험요인	107
〈표 Ⅲ-9〉 아크 플래쉬 위험 관련 안전조치 사항	109
〈표 Ⅲ-10〉 전기자동차 정비 관련 작업 및 영향요인	109
〈표 Ⅲ-11〉 전력시스템 변화와 다양한 전력안보 요인에 대한 잠재적 영향	116
〈표 Ⅳ-1〉 산업안전보건기준에 관한 규칙 현행화 검토	123
〈표 Ⅳ-2〉 접지 관련 한국전기설비규정(KEC) 비교	126
〈표 Ⅳ-3〉 누전차단기 관련 한국전기설비규정(KEC) 비교	127
〈표 Ⅳ-4〉 전기작업 범위 등 관련 법령 비교	135
〈표 Ⅳ-5〉 전기작업 관련 관계 법령	136
〈표 Ⅳ-6〉 한국전기설비규정(KEC) 대비 고용부 고시 현행화 검토(안)	140
〈표 Ⅳ-7〉 고용부 고시 및 KEC 항목별 비교	141
〈표 Ⅳ-8〉 교류 시스템의 노출 충전부 접근한계영역	148
〈표 Ⅳ-9〉 직류 시스템의 노출 충전부 접근한계영역	149
〈표 Ⅳ-10〉 고용부 고시 현행화 검토	151
〈표 Ⅳ-11〉 태양광 발전설비 화재사고	152
〈표 Ⅳ-12〉 에너지저장장치(ESS) 화재사고	152
〈표 Ⅳ-13〉 지락전류의 급격한 변화에 따른 지락차단장치 동작시간	155

그림목차

[그림 I-1] 연구추진 체계도	5
[그림 II-1] 산업재해 발생형태 별 재해자수 대비 사망자수 비율	12
[그림 II-2] 미국의 감전 사망자수 현황	15
[그림 II-3] 2013~2022년 감전사고 발생현황	16
[그림 II-4] 2013~2022년 감전사고 형태별 발생현황	17
[그림 II-5] 2022년 감전사고 전압별 발생현황	21
[그림 II-6] 최근 10년간 감전 중대재해 발생현황	27
[그림 II-7] 중대재해 조사의견서 분석 방법 및 절차	30
[그림 II-8] 감전 재해예방의 기본원리	32
[그림 II-9] 인체저항 구성도	33
[그림 II-10] IEC 60479-1에 따른 인체반응 영역	34
[그림 II-11] 통전전류에 따른 인체반응	34
[그림 II-12] 감전 매커니즘 기반 분석 모형	35
[그림 II-13] 감전전압(크기)별 중대재해 발생현황	50
[그림 II-14] 발생 형태별 감전 중대재해 발생 비교 현황	55
[그림 II-15] 장소별 감전 중대재해 발생 비교 현황	56
[그림 II-16] 공정별 감전 중대재해 발생 비교 현황	57
[그림 II-17] 작업별 감전 중대재해 발생 비교 현황	58
[그림 II-18] 작업위치별 감전 중대재해 발생 비교 현황	59
[그림 II-19] 작업자수별 감전 중대재해 발생 비교 현황	60

그림목차

[그림 II-20] 작업목적별 감전 중대재해 발생현황	61
[그림 II-21] 작업자 직종별 감전 중대재해 발생현황	62
[그림 II-22] 기인물별 감전 중대재해 발생현황	63
[그림 II-23] 전원차단 여부별 감전 중대재해 발생현황	64
[그림 II-24] 전원상태별 감전 중대재해 발생현황	65
[그림 II-25] 충전부별 감전 중대재해 발생현황	66
[그림 II-26] 충전부 접촉형태별 감전 중대재해 발생현황	67
[그림 II-27] 통전형태별 감전 중대재해 발생현황	68
[그림 II-28] 아크발생별 감전 중대재해 발생현황	69
[그림 II-29] 사망시점별 중대재해 발생현황	70
[그림 II-30] 산업안전보건기준에 관한 규칙 조항별 감전 중대재해 발생현황 ...	71
[그림 III-1] STEPS의 화석연료 수요 전망	86
[그림 III-2] 태양광 산업 제조생산 설비 증설 전망	86
[그림 III-3] 시나리오별 글로벌 에너지 소비 전망	88
[그림 III-4] 2050년 전력수요 및 시나리오별 전력믹스 전망	89
[그림 III-5] 시나리오별 글로벌 에너지소비 전망	90
[그림 III-6] 시나리오별 글로벌 발전량 구성 전망	91
[그림 III-7] 시나리오별 글로벌 전력 공급망 투자 전망	91
[그림 III-8] 시나리오별 화석연료, 원자력 및 신재생에너지 수요 전망	93
[그림 III-9] 태양광 및 풍력 추가 설비용량 전망	93

[그림 Ⅲ-10] 전기자동차 유형별 시장 점유율 전망	94
[그림 Ⅲ-11] 글로벌 에너지부문 이산화탄소 배출량 변화 추이	95
[그림 Ⅲ-12] 기 발표 태양광발전 및 배터리 프로젝트 증가 전망	95
[그림 Ⅲ-13] 글로벌 전기차 및 히트펌프 판매량 변화	97
[그림 Ⅲ-14] 주요 청정에너지 기술 성숙도 변화	97
[그림 Ⅲ-15] 넷제로 시나리오의 에너지믹스 전망	98
[그림 Ⅲ-16] 각국 NDC 포함 탄소 배출량 저감 목표	99
[그림 Ⅲ-17] 태양광·풍력 에너지저장장치 화재발생 건수 및 피해액	106
[그림 Ⅲ-18] 아크 플래쉬 발생시 위험요인	108
[그림 Ⅳ-1] 2022년 국내 신재생에너지 생산량	144
[그림 Ⅳ-2] 2022년 국내 신재생에너지 발전량	144
[그림 Ⅳ-3] 2022년 국내 신재생에너지 보급 용량	145
[그림 Ⅳ-4] 2022년 국내 신재생에너지 산업 현황	146
[그림 Ⅳ-5] 2022년 국내 신재생에너지 산업 업종별 현황	146
[그림 Ⅳ-6] 정상운전 상태에서의 누설전류 측정값	153
[그림 Ⅳ-7] 지락사고 발생 시 누설전류 측정값	154
[그림 Ⅳ-8] 다양한 필터로 구성되는 지락차단장치(RCD) 블럭도	156
[그림 Ⅳ-9] 필터제어를 통한 완만한/급격한 지락전류에 따른 동작	157
[그림 Ⅳ-10] 완만한 지락전류 검출 회로	157
[그림 Ⅳ-11] 급격한 지락전류 검출 회로	158

그림목차

[그림 V-12] 직류 지락차단장치 트립회로 구성도	159
[그림 V-13] 태양광 발전설비의 지락차단장치 설치 사례	160
[그림 V-14] DC 산업군에서의 직류아크 검출 개념도	163
[그림 V-15] 태양광 발전설비의 직류아크 검출장치 임피던스 적용 사례 ...	163
[그림 V-16] 태양광 발전설비의 직류아크 검출장치 공진필터뱅크 적용 사례 ..	164
[그림 V-17] 태양광 발전설비의 직류아크 검출장치 설치 사례	165
[그림 V-18] PCB 기판 전면 및 후면	165
[그림 V-19] 회로도 도면	166
[그림 V-20] 외함 도면	166
[그림 V-21] 전기저장장치(ESS) 위험성평가 절차	168
[그림 V-22] 전기작업 허가 절차	169

I. 서론



I. 서론

1. 연구목적 및 필요성

1) 연구목적

감전 중대재해 조사의견서에 대한 발생원인의 재해석, 위험요인 재분류 및 안전관리 개입지점의 상세화를 통해, 미래 전기에너지 변화에 따른 새로운 위험성을 안전한 수준으로 관리·통제할 수 있는 기술적·제도적 개선방안을 제시하고자 한다.

2) 연구배경 및 필요성

신재생에너지 발전 증가세와 함께 기존 제조설비의 노후화로 누전에 따른 감전, 유지보수 시 충전부 직접 접촉 및 전기화재 사고가 지속적으로 발생하고 있다. 이에 전기에너지 및 제조설비의 변화에 따른 새로운 위험요인의 발현이 예상됨에 따라 전기사고 원인분석을 통해 시사점을 도출하여 미래 전기에너지 패러다임 변화에 효과적으로 대응할 필요가 있다.

2. 연구내용 및 방법

1) 연구내용 및 방법

(1) 전기에너지 관련 실태 파악 및 미래 산업구조 변화 분석

선행연구 분석 및 문헌고찰 등을 통해 미래 전기에너지 관련 실태를 파악하고 그에 따른 미래 산업구조 변화를 분석하여 분석결과에 따른 대응방안을 모색하였다.

(2) 전기재해 관련 발생유형 분류 및 발생원인 분석

2013년부터 2022년까지 감전 관련 중대재해 조사의견서 186건을 분석하였다. 그리고 전기안전공사 전기재해통계와 비교 분석을 통해 시사점을 도출하였다. 중대재해 조사의견서 분석결과에 대한 빈도분석, 유형화 및 교차분석 등을 통해 재해예방영역을 설정하고 법·제도 사각지대를 해소하고자 하였다.

(3) 미래 전기에너지 변화 대응을 위한 개선과제 도출

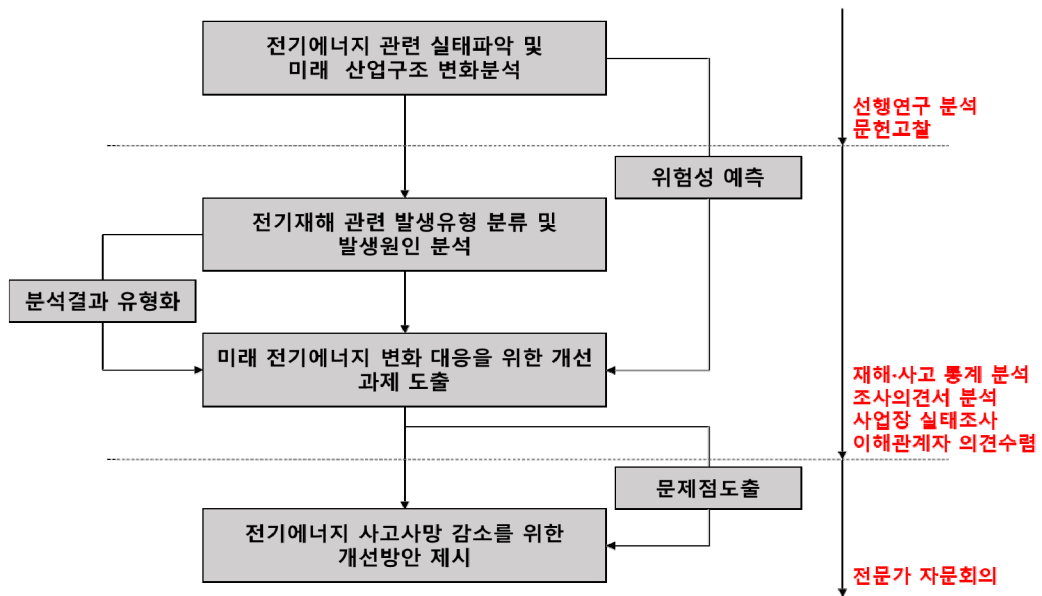
미래 전기에너지 변화 분석을 통해 산업안전 측면에서의 위험성을 예측하고 위험성 관리 및 대응을 위한 개선과제를 도출하였다.

(4) 전기에너지 사고사망 감소를 위한 개선방안 제시

중대재해조사 의견서 분석 및 미래 전기에너지 변화 예측을 통해 현행 산업안전보건법 및 기준규칙 개선(안)을 제안하고 안전기술을 개발하였다. 또한 전기작업에 대한 위험성평가 및 안전작업 허가 절차도 마련하였다.

2) 연구추진 체계

다음 [그림 I-1]은 본 연구의 효율적 추진을 위해 연구내용 및 방법을 토대로 작성한 연구추진 체계도이다.



[그림 I-1] 연구추진 체계도

3. 선행연구

1) 선행연구 고찰

미래 전기에너지 변화 대응 관련 선행연구를 다음 <표 I-1>과 같이 고찰하였다.

<표 I-1> 선행연구 현황

년도	연구과제명	저자	주요 내용
2022	신재생에너지 관련 위험요인 예측 및 안전기준 개선	변정환	가. 탄소중립 관련 미래 에너지 환경 변화 관련 안전보건 전망 및 분석 나. 신재생에너지 관련 기술 및 산업 현황을 파악하고 관련 위험요인 예상 다. 신재생에너지 관련 안전기준 개선(안) 제언 및 안전보건기술지침 개정
2021	스마트팩토리 안전보건수준 파악 연구	변정환	가. 스마트팩토리의 새로운 위험을 고찰하기 위한 산업재해 발생현황 분석 나. 실태조사를 통해 스마트팩토리 사업장의 공정특성 조사 및 안전성 평가 다. 스마트팩토리 안전시스템 평가 관련 제언 및 안전보건기술지침 제정
2016	전기안전 신공법의 안전조치기준 개발에 관한 연구	최상원 최승동	가. 중대재해 분석을 통해 전기안전 신공법 관련 재해 정밀 분석 나. 전기안전 신공법 관련 실태조사를 통해 국내외 안전기술 및 기준 조사분석 다. 전기안전 신공법 관련 위험요인 도출결과와 산업안전보건기준에 관한 규칙 반영 검토
2015	이동용 전기기계기구에서의 감전 위험성 감소대책에 관한 연구	최상원 김정태	가. 감전 관련 재해 및 사고분석을 통해 이동용 전기기계기구의 위험성을 분석 나. 실증실험 및 시뮬레이션을 통해 이동용 전기기계기구 전선의 교체주기 선정 다. 감전재해 예방을 위한 접지 연속성 안전기술 개발
2013	감전재해 예방을 위한 사업장 실태 및 감전환경 조사	김두현	가. 전기기계기구 사용실태 조사를 통해 국내 건설현장의 감전환경 조사 및 비교 나. 실태조사 결과를 토대로 국내 제조현장과의 비교하여 시사점 도출 다. 국내외 전기설비 및 안전기준 등 조사/분석을 통해 안전보건기준에 관한 규칙 개정(안) 제시

2) 기존 연구와의 차별점

국제에너지기구(IEA) 2050 탄소중립 시나리오, 우리나라의 2050 탄소중립 추진 전략 및 제5차 신재생에너지 기본 계획 등에 따라 신재생에너지의 보급·사용이 확대되고 있으며, 제4차 산업혁명에 따라 산업현장의 자동화·무인화·스마트화 등 디지털 전환이 가속화되고 있다. 이러한 미래환경 및 산업구조 변화에 따라 전기안전 패러다임도 전환되고 있다는 점을 고려하여 최근 10년간 감전 중대재해 조사의견서 심층 분석을 통해 현재 전기안전 관련 법·고시 사각지대를 발굴하여 해소하고, 전기안전 패러다임 전환에 따른 문제점 및 시사점을 도출하여 향후 전기안전 관련 법·고시 제·개정에 활용하고자 한다.

그리고 기존 선행연구에서는 미래 전기에너지 변화를 예측하고 위험성에 대응하는 연구가 일부 수행되었으나 현재 시점에서는 미래 전기에너지 관련 기술 변화 양상이 급속히 변화되고 있어, 본 연구에서는 새로운 전기에너지 패러다임으로 인한 실제 산업현장의 공정과 기술의 실제 변화를 예측하고 위험요인을 도출하여 전기에너지의 안전한 취급·사용과 관련 위험성 대응을 위한 안전기술을 포함한 다양한 개선과제를 도출하고자 한다.

또한 산업통상자원부가 2018년에 전기설비기술기준의 판단기준과 내선규정 그리고 IEC 등을 통합해 공고한 한국전기설비규정(KEC)¹⁾이 2021년부터 산업현장에 전면 적용되고 있어 산업현장의 혼란을 최소화하고 산업안전 관련 법·제도 등의 현행화를 위한 전기안전 기준 개선(안)을 제안하고자 한다.

최종적으로 본 연구에서는 중대재해 조사의견서 분석 및 미래 전기에너지 변화 분석을 통해 안전관리 사각지대를 해소하고 미래환경 및 산업구조 변화에 대한 전기 안전조치의 탄력성을 향상하고자 한다.

1) 한국전기설비규정(Korea Electro-technical Code, KEC)은 전기사업법 제67조에 의한 전기설비기술기준에서 정하는 전기설비의 안전 성능과 기술적 요구사항을 구체적으로 정하는 것으로, 전기설비의 설계, 시공, 운영 및 유지보수 관련 기술적 지침과 안전기준을 제시하여 전기사용의 안전성과 효율성을 보장하는데 목적이 있다.

Ⅱ. 산업현장 전기사고 발생원인

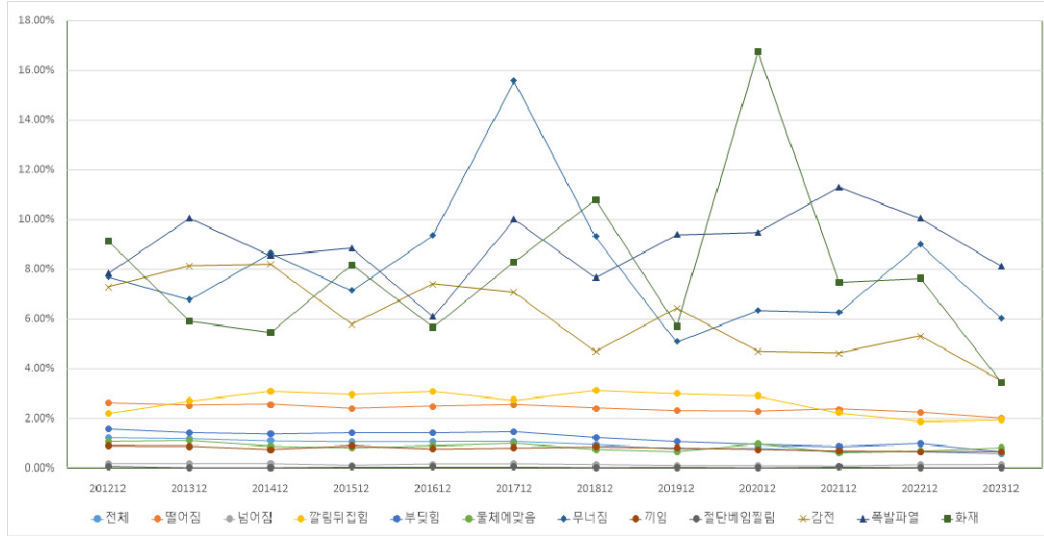


Ⅱ. 산업현장 전기사고 발생원인

1. 배경

산업현장의 전기사고는 동전기(動電氣), 정전기(靜電氣), 낙뢰 및 전자파 등의 전기에너지 형태에 따라서 인체 감전, 전기설비 화재·폭발 및 기계·설비 장애 등으로 구분할 수 있다. 이때 동전기(動電氣)는 인체 감전을 포함 다양한 형태의 전기사고를 유발할 수 있으며, 정전기(靜電氣)는 인체 감전보다는 기계·설비 및 물질 등에서 정전기 방전으로 인한 화재·폭발을, 낙뢰는 인체 감전 및 기계·설비 및 건축물 등의 손상을, 마지막으로 전자파는 기계·설비의 오작동을 유발하여 2차 사고를 유발할 수 있다. 여기서 동전기(動電氣)에 의한 감전은 인체 일부 또는 전체에 전류가 흐르는 현상으로 전기에너지로 인한 신체 고통, 근육 수축, 호흡 곤란 및 심실세동이 발생하는 전격(Electrical Shock)과 전기화상으로 각각 구분한다.

특히 산업현장에서의 감전사고는 노동자가 작업 중 전기에너지에 직접 접촉되거나 전기 기계·설비의 절연열화로 인한 간접접촉으로 발생하는데, 이러한 감전사고의 결과로 대부분의 노동자가 사망하거나 화상 등 중상해 부상을 입는다. 다음 [그림 Ⅱ-1]에서는 산업재해 발생형태 별로 재해자수 대비 사망자수를 구분하였다. 여기서 감전사고의 경우 무너짐, 화재 및 폭발·파열과 함께 재해자 대비 사망자 비율이 높은 점을 고려한다면, 연간 발생 건수가 상대적으로 낮다고 하더라도 중상재 재해의 사고사망 연계 차단을 위해 감전사고 예방 영역을 타겟팅하여 집중관리 할 필요성이 있다.



[그림 II-1] 산업재해 발생형태 별 재해자수 대비 사망자수 비율

또한 미래환경 변화 및 전기에너지 패러다임 전환에 따른 새로운 형태의 감전사고도 발생할 수 있고 실제로 발생하고 있다. 2024년 4월 5일 교통사고 전기자동차의 수습 중 감전사고가 발생하였다. 이 감전사고는 견인기사가 교통사고 수습을 위해 전기자동차 운전석에 앉아 시동을 거는 순간 발생하였으며, 견인기사가 마비증상을 느껴서 119에 감전되었음을 직접 신고했고, 병원으로 이송되어 중환자실에서 치료를 받았다고 한다.

차량 제조사나 전문가 모두 교통사고 전기자동차의 수습 과정에서 감전사고가 발생한 것은 전 세계적으로 유례가 없다고 한다. 그러나 제조사들은 초기부터 전기자동차 이상 발생 시 전기를 차단하는 장치를 개발하여 적용해 오고 있으며, 시동부를 제외한 대부분의 인포테인먼트(Infotainment)¹⁾ 시스템을 12V로 사용하고 있다. 최근 들어 48V 비중을 높이는 추세이기는 하나 전기

1) 정보를 의미하는 인포메이션(information)과 다양한 오락거리를 일컫는 '엔터테인먼트(entertainment)'의 개념을 결합한 통합 멀티미디어 시스템이다. 내비게이션이나 오디오와 같은 전통적인 기능은 물론, 자동차가 제공하는 각종 정보를 확인하고 기능을 조작하기 위한 장치다.

자동차가 감전사고를 유발할 가능성은 매우 희박하다는 것이 중론이다.

그럼에도 불구하고 전기자동차는 고전압 배터리를 장착하고 있으며, 누전에 따른 감전사고 발생 가능성이 높기 때문에 안전장비 및 보호구를 갖춘 전문가가 작업할 필요성이 있다. 또한 전기자동차의 정비 작업 중에도 유사한 형태의 감전사고가 발생할 수 있기 때문에, 전기자동차 정비 작업 매뉴얼의 보완도 필요하다. 이에 소방청에서는 전기자동차 감전으로 인한 사고를 막기 위한 자체 매뉴얼을 보유하고 있는데, 인명구조와 화재진압 시 절연성능을 가지는 안전장비 및 보호구를 착용할 것을 권고하고 있다.

본 장에서는 전기에너지로 인한 여러 발생형태의 사고 중에서 인체 감전 관점에서 산업현장의 전기사고 발생 원인을 다양한 기법으로 분석하여 미래 환경 변화 및 전기에너지 패러다임 전환에 따른 전기분야 안전조치 개선에 활용하고자 한다.

2. 산업현장 전기사고·재해 발생현황

1) 세계 주요국 감전 사망자수 비교

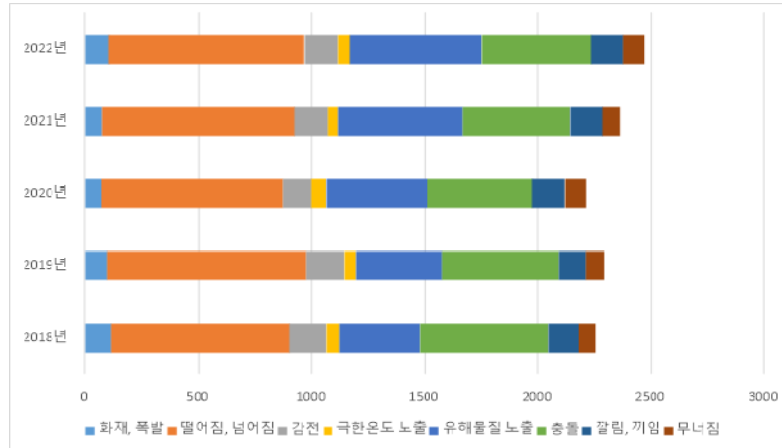
(1) 미국

미국의 감전 사망자수는 다음 <표 I-1>와 같다. 2018년부터 2022년까지 발생형태 별 사망자수 비교에서 감전 사망자수 비중이 5.7%~7.2%로 우리나라 보다 최대 3.7배 정도 높다²⁾. 이는 산업구조, 근로자수, 재해인정 범위 및 통계 분류 기준 등 다양한 변수에 대한 추가적인 검토가 필요한 부분이다.

<표 II-1> 미국의 감전 사망자수 현황

구분	2018년		2019년		2020년		2021년		2022년	
	건수	비중	건수	비중	건수	비중	건수	비중	건수	비중
계	2,257	100%	2,298	100%	2,215	100%	2,367	100%	2,475	100%
화재·폭발	115	5.1%	99	4.3%	71	3.2%	76	3.2%	107	4.3%
떨어짐·넘어짐	791	35.0%	880	38.3%	805	36.3%	850	35.9%	865	34.9%
감전	160	7.1%	166	7.2%	126	5.7%	152	6.4%	145	5.9%
극한온도	60	2.7%	53	2.3%	62	2.8%	43	1.8%	51	2.1%
유해물질	355	15.7%	379	16.5%	448	20.2%	551	23.3%	586	23.7%
충돌	566	25.1%	518	22.5%	468	21.1%	473	20.0%	484	19.6%
깔림·끼임	137	6.1%	120	5.2%	142	6.4%	143	6.0%	142	5.7%
무너짐	73	3.2%	83	3.6%	93	4.2%	79	3.3%	95	3.8%

2) 최근 10년간 한국의 감전사고 사망자 수 비중은 전체 발생형태에서 1.9%~3.2% 정도를 차지하고 있다.



[그림 II-2] 미국의 감전 사망자수 현황

(2) 그 외 각국

2022년 한국전기안전공사의 전기재해 통계분석(제32호) 자료에 따르면 우리나라의 인구 백만명당 감전 사망자수는 다음 <표 II-2>와 같이 일본과 영국에 비해서 각각 5.4배, 2.5배 높다³⁾. 다만, 세계 각국의 감전 사망자수는 국가별 송·배전 방식, 전기설비 사용 환경, 산업구조 및 경제 여건 등에 따른 안전 정책, 투자 규모 및 통계분류 차이에 따라 발생 수준이 다르다. 특히, 인도의 경우 인구 백만명당 감전 사망자수가 약 9명으로 다른 국가와 비교 시 상당히 높아서 산업구조 및 안전조치 등을 고려하여 추가적인 검토가 필요하다.

<표 II-2> 각국의 백만명당 감전 사망자수

구분	한국	일본	영국	호주	뉴질랜드	아일랜드	인도
사망자수(명)	18	8	9	9	0	-	12,529
백만명당 사망자수(명)	0.348	0.064	0.134	0.350	0	-	9.079
인구수 (백만명)	51.6	124.9	67.3	25.7	5.2	4.9	1,380
자료년도	2022	2022	'21-'22	'21-'22	'21-'22	2020	2021

3) 일본과 영국은 산업재해에 의한 감전 사망자수이다.

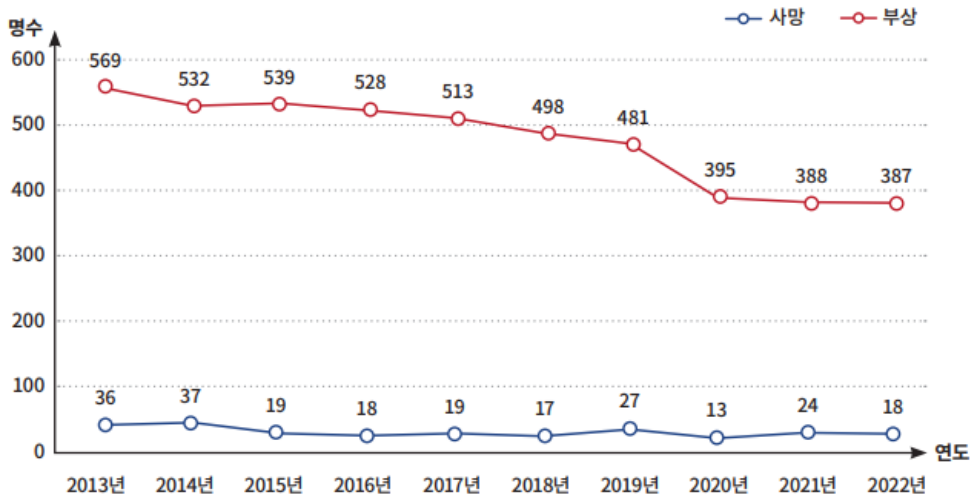
2) 전기안전공사 전기재해 통계

(1) 개요

매년 전기안전공사에서는 변사 사고 처리자 중 감전 사망자에 대한 전국 경찰서의 조사 결과와 감전사고로 병원에 입원·치료하였거나 입원 중인 자에 대한 병원 치료기록을 토대로 전기재해 통계자료를 생산하고 있다. 2022년 전기재해 통계 분석·조사 자료를 토대로 산업재해 통계와 비교·분석하고 새로운 데이터를 수집하여 산업현장의 전기사고 예방을 위한 인사이트(Insight)를 도출하고자 한다.

(2) 최근 10년간 감전사고 추이

2013년부터 2022년까지의 감전사고 발생현황은 다음 [그림 II-3]과 같이 2013년 605건에서 2022년에 405건이 발생하여 약 33.1%가 감소하였다. 다만, 감전사고 부상자수는 2020년부터, 사망자수는 2015년부터 감소율이 정체되고 있다.



※ 자료: 2022년도 전기재해통계분석 제32호(전기안전공사)

[그림 II-3] 2013~2022년 감전사고 발생현황

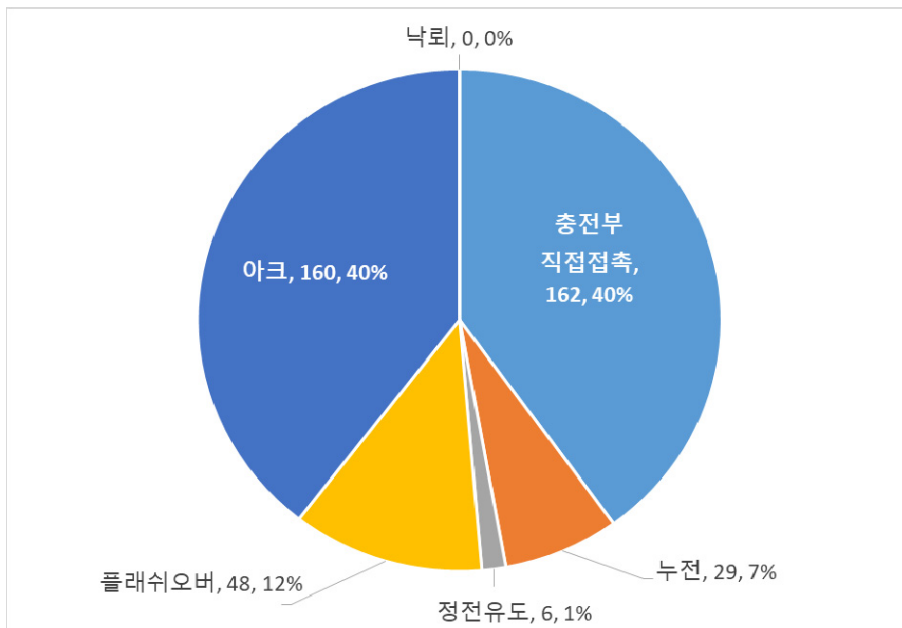
(3) 형태별 감전사고

2022년 형태별 감전사고 발생 현황은 다음 <표 II-3> 및 [그림 II-4]와 같다. 충전부 직접접촉으로 인한 감전사고가 전체의 40.0%(162명)를 차지하며, 아크로 인한 감전사고가 39.5%(160명)를 차지한다.

<표 II-3> 2022년 형태별 감전사고 발생현황

구분	계	충전부 직접접촉	누전	정전유도	플래쉬 오버	아크	낙뢰
계(명)	405	162	29	6	48	160	-
사망자(명)	18	14	2	1	-	1	-
부상자(명)	387	148	27	5	48	158	-

* 2022년도 전기재해통계분석 제32호(전기안전공사)



[그림 II-4] 2013~2022년 감전사고 형태별 발생현황

(4) 직종별 감전사고

2022년 직종별 감전사고 발생 현황은 다음 <표 II-4>와 같다. 감전사고가 가장 많이 발생하는 직종은 전기기술자로 전체 사상자의 36.5%인 144명(사망 5명, 부상 139명)이 발생하였다. 다음으로 기계/설비 종사자 32명(사망 1명, 부상 31명), 생산직 종사자 30명(사망 1명, 부상 29명) 순으로 많이 발생하였다. 즉, 대부분의 감전사고 사망자는 산업현장에서 발생하고 있다.

<표 II-4> 2022년 직종별 감전사고 발생현황

구분	계(명)	사망자(명)	부상자(명)
계(명)	405	18	387
전기기술자	144	5	139
기계/설비	32	1	31
간판/통신설비	5	0	5
생산직	30	1	29
건설/인테리어	17	2	15
중장비 운전	4	0	4
경찰/군인/소방	6	0	6
판매/서비스	11	0	11
사무직	18	0	18
농어민	16	4	12
주부	11	0	11
미취학아동	13	0	13
초등학생	4	0	4
중학생	7	0	7
고등학생	2	0	2
무직	13	0	13
기타	72	5	67

가) 전기기술자

전기기계·기구 및 설비의 시공, 관리 및 유지보수 관련 전기기술자의 감전 사상자수는 다음 <표 II-5>과 같이 사망 5명, 부상 139명으로 144명이다.

<표 II-5> 전기기술자 감전사고 발생현황

구분	계	전기 공사/보수	전기 운전/점검	가전기기 운전/보수	이동기기 점검/조작	농/어업	기타
계	144	114	23	2	2	1	2
사망자(명)	5	4	1	0	0	0	0
부상자(명)	139	110	22	2	2	1	2

나) 생산직 종사자

공장 및 제조업체 등 산업현장에서 종사하는 노동자 감전 사상자수는 다음 <표 II-6>과 같이 사망 1명, 부상 29명으로 30명이다.

<표 II-6> 생산직 종사자 감전사고 발생현황

구분	계	전기 공사/보수	전기 운전/점검	이동기기 점검/조작	기계설비 공사/보수	청소/도색 작업	기타
계	30	2	9	1	7	8	1
사망자(명)	1	0	0	1	0	0	0
부상자(명)	29	2	9	0	7	8	1

다) 기계설비직 종사자

기계·설비직 종사자의 감전 사상자수는 다음 <표 II-7>과 같이 사망 1명, 부상 31명으로 32명이다.

<표 II-7> 기계·설비직 감전사고 발생현황

구분	계	전기 공사/보수	전기 운전/점검	가전기기 운전/보수	이동기기 점검/조작	기계설비 공사/보수	건설/굴착 공사
계	32	3	4	1	2	21	1
사망자(명)	1	0	0	0	1	0	0
부상자(명)	31	3	4	1	1	21	1

(5) 행위별 감전사고

2022년 행위별 감전사고 발생 현황은 다음 <표 II-8>과 같다. 여기서 약 50% 정도의 감전사고가 전기공사/보수 및 전기운전/점검 등 전기작업에서 발생하고 있다. 또한 전기공사/보수 행위에서만 사망자가 6명이 발생하였기 때문에, 관련 공정·작업 및 근로자 대상으로 추가적인 안전조치를 검토할 필요성이 있다.

여기서 주목할 점은 산업 분야가 아닌 농·어업 분야에서도 감전사고 사망자가 2명이 발생하여, 관련 전기기계·기구 및 설비 취급 및 사용 시 감전사고 예방을 위한 안전조치가 수반되어야 할 것이다.

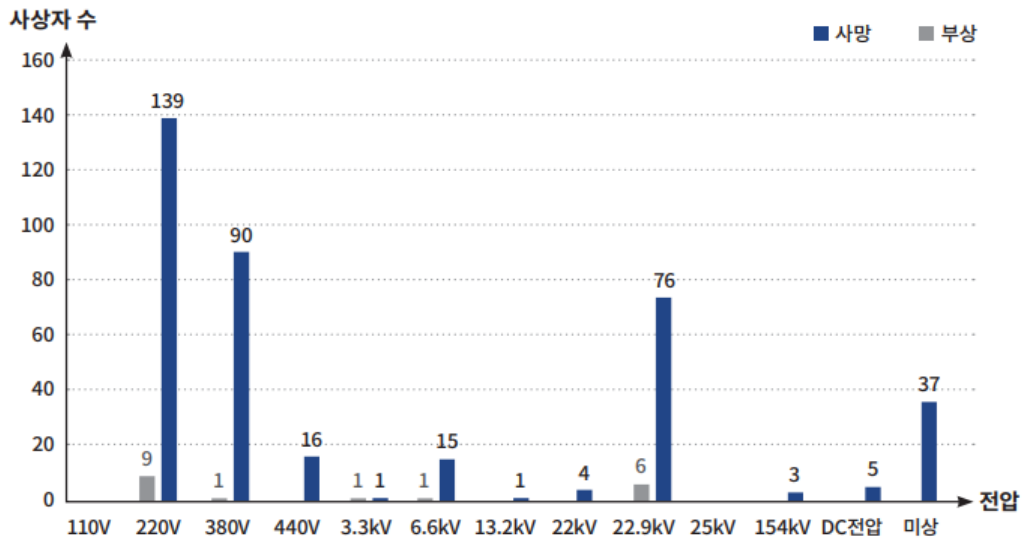
<표 II-8> 2022년 행위별 감전사고 발생현황

	계	사망자(명)	부상자(명)	점유율(%)
계	405	18	387	100
전기공사/보수	142	6	136	35.1
전기운전/점검	57	1	56	14.1
가전기기 운전/보수	27	1	26	6.7
이동기기 점검/조작	24	1	23	5.9
간판설치/통신시설	4	0	4	1.0
기계설비 공사/보수	30	0	30	7.4
건설/굴착 공사	13	1	12	3.2
청소/도색작업	9	0	9	2.2
농어업 활동	16	2	14	4.0
장난 및 놀이	16	0	16	4.0
보행	6	0	6	1.5
자살	1	1	0	0.2
기타	60	5	55	14.8

(6) 전압별 감전사고

2022년 전압별 감전사고 발생 현황 다음 [그림 II-5]와 같다. 여기서 1,000V 이하 저압에서의 감전사고 사상자수는 255명(사망 10명, 부상 245명)으로, 고압 및 특별고압에서의 사상자수 108명(사망 8명, 부상 100명)보다 많았다. 특히 저압에서는 220V에서, 고압 이상에서는 22.9kV에서 사망자와 부상자가 가장 많이 발생하였다. 이는 산업현장 등에서 제조 공정을 운용하기 위해 기계·설비를 운전하거나 전기를 공급하기 수·배전 설비에서 가장 많이 취급되는 전압이다.

또한 직류전원으로 인한 부상자도 5명이 발생하였는데, 향후 미래 전기에너지 패러다임 변화를 고려한다면 전기화재에 취약한 직류 위험성에 대한 고찰이 필요한 시점이다.



※ 자료: 2022년도 전기재해통계분석 제32호(전기안전공사)

[그림 II-5] 2022년 감전사고 전압별 발생현황

(7) 전기설비별 감전사고

산업현장에서는 다양한 공정·작업에서 다양한 제조·생산 설비 및 건설장비 등을 취급·사용하고 있어, 감전사고도 특별고압·고압 및 저압 그리고 전기기계·기구 및 설비에서 다양하게 발생하고 있다.

2022년 전기설비별 감전사고 발생 현황은 다음 <표 II-9>와 같다. 특고압 설비에서는 케이블/전선으로 인한 사상자수가 51명, 변압기로 인한 사상자수가 23명이 발생하였다. 저압설비에서는 차단기/개폐기로 인한 사상자수가 42명, 저압선로로 인한 사상자수가 41명이 발생하였다. 전기기계·기구에서는 제조 장비/설비로 인한 사상자수가 19명, 이동용 전기기기로 인한 사상자수가 17명이 발생하였다. 특히 사망자수는 특별고압 및 고압 설비에서는 차단기/개폐기 4명, 케이블/전선 2명 및 변압기 1명, 저압 설비에서는 전로 2명, 계량기 1명, 기타 2명, 그리고 전기기계·기구에서는 이동용 전기기기 2명, 가전기기 1명, 기타 2명이 발생하였다.

산업재해 통계에서도 감전사고 사망 관련 기인물을 분석 및 분류하고 있다. 전기재해 통계와 산업재해 통계는 조사 대상 및 방식, 분류 기준 및 분석 방법 등이 서로 달라서 수치상의 비교를 통한 시사점을 도출하기는 어렵다.

다만, 다음 내용에서 다루어질 감전 산업재해 통계 분류 및 분석에서는 전기재해 통계에서 분석된 전기설비 분류 기준을 참고 및 활용하여 분류 및 분석하여, 산업재해 통계와 전기재해 통계의 비교를 통한 차이점 및 각각의 특성을 파악하고자 한다.

〈표 II-9〉 2022년 전기설비별 감전사고 발생현황

구분		계(명)	사망자(명)	부상자(명)	점유율(%)
계		405	18	387	100
특별고압 및 고압	케이블/전선	51	2	49	12.6
	변압기	23	1	22	5.7
	차단기/개폐기	15	4	11	3.7
	전동기	0	0	0	0.0
	변성기	5	1	4	1.2
	발전기	0	0	0	0.0
	애자	3	0	3	0.7
	지지물/방호설비	5	0	5	1.2
	피뢰기	1	0	1	0.2
	기타	8	0	8	2.0
저압	콘센트	22	0	22	5.4
	전로	41	2	39	10.1
	차단기/계폐기	42	0	42	10.4
	배분전반	21	0	21	5.2
	계량기	3	1	2	0.7
	스위치	2	0	2	0.5
	비상용발전기	3	0	3	0.7
	기타	47	2	45	11.6
전기 기계기구	제조장비/설비	19	0	19	4.7
	가전기기	16	1	15	4.0
	조명기구	6	0	6	1.5
	이동용전기기기	17	2	15	4.2
	이동용접속기구	8	0	8	2.0
	전동기	12	0	12	3.0
	간판	2	0	2	0.5
	가로등/신호등	1	0	1	0.2
	기타	32	2	30	7.9

(8) 장소별 감전사고

2022년 장소별 감전사고 발생 현황은 다음 <표 II-10>과 같다. 감전사고는 공장 및 건설현장 등 산업현장의 사상자수가 143명으로 가장 많고, 주거 및 사무 시설 등에서 109명으로 다음 순으로 많다. 다만, 전기재해 통계에서는 감전사고가 공장 등 비건설업에서 많이 발생하고 있지만, 산업재해 통계에서는 건설업에서 많이 발생하고 있어 다소 상반된 결과를 보여주고 있다⁴⁾.

다만, 특별고압 및 고압 전기를 취급하는 발·변전소 및 송·배전선로에서는 전체 재해자수 대비 사망자의 비율이 높았다.

<표 II-10> 2022년 장소별 감전사고 발생현황

구분	계	사망자(명)	부상자(명)	점유율(%)
계	405	18	387	100
발·변전소	17	2	15	4.19
송배전선로	14	1	13	3.45
공장	113	4	109	27.90
건설현장	30	1	29	7.40
공공시설	12	0	12	2.96
통신주/가로등주	3	0	3	0.74
관공서/군부대	6	0	6	1.48
학교/종교/의료	9	1	8	2.22
요식/유흥/숙박	11	1	10	2.71
유통/판매	6	0	6	1.48
빌딩/오피스텔	51	2	49	12.59
주거시설	58	2	56	14.32
야외/해상	30	3	27	7.40
기타	45	1	44	11.11

4) 산업재해통계에서는 2013년부터 2022년까지 186건의 감전 사고사망자 발생하였으며, 건설업 108명, 비건설업 78명이 각각 발생하였음

(9) 화상 감전사고

감전사고 화상은 충전부 접촉에 의한 전류의 인체 통전 시 발생하는 줄열(Joule Heating)이나 아크(Arc) 등으로 인해 세포가 괴사 되는 등 일반적인 화상과는 다른 양상을 보인다. 다음 <표 II-11> 및 <표 II-12>에서는 2022년 기준 감전사고로 병원에서 치료받은 환자를 대상으로 조사한 인체 화상 범위와 화상 정도를 나타내고 있다.

인체 화상 범위의 경우 전체 치료 환자 중 82.7%가 인체 10% 이내의 화상을 입었으며, 특히 인체 화상 정도의 경우 2도와 3도의 화상 환자 비율이 82.7%이며, 4도에서 사망률(38.5%)이 가장 높다.

<표 II-11> 인체 화상범위별 감전사고 발생현황

구분	계	0~5%	6~10%	11~20%	21~30%	31~40%	41~50%	51~60%	60%초과
계	405	258	77	38	14	11	3	1	3
사망(명)	18	6	8	-	1	2	-	-	1
부상(명)	387	252	69	38	13	9	3	1	2

<표 II-12> 인체 화상정도별 감전사고 발생현황

구분	계	1도	2도	3도	4도
계	405	57	178	157	13
사망(명)	18	3	3	7	5
부상(명)	387	54	175	150	8

3. 감전 중대재해 조사의견서 분석

1) 감전 중대재해 발생 개요

(1) 현황

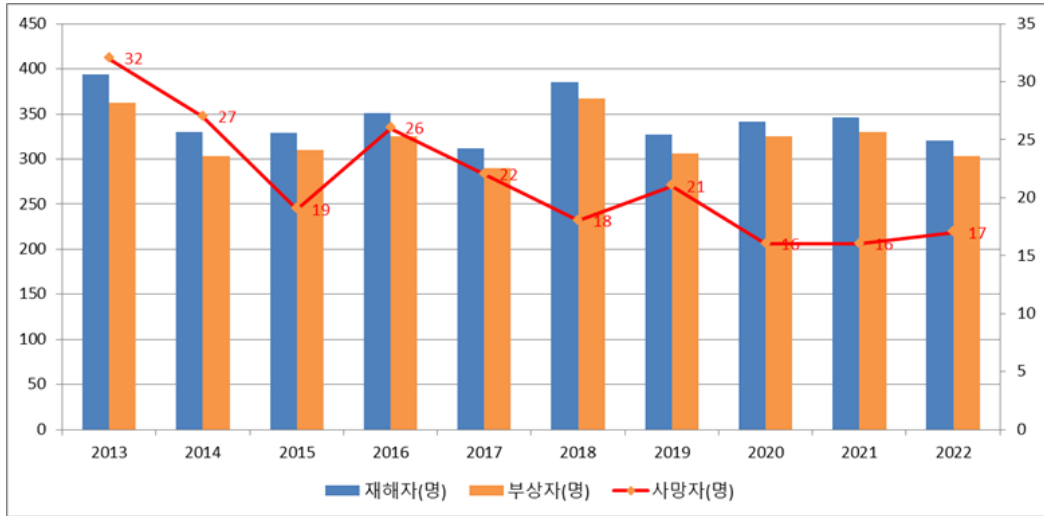
다음 <표 II-13>과 [그림 II-6]은 산업재해 통계에서 추출한 2013년부터 2022년까지 발생한 감전재해 발생 현황이다.

감전사고 사망자수는 2013년부터 2020년까지는 등락(登落)⁵⁾을 반복하면서 감소 추세를 보이고 있으나, 2020년부터는 사망자수 감소 추세가 정체되고 있다. 또한, 부상자수는 2013년부터 2022년까지 등락(登落)을 반복하면서 사망자수와 달리 뚜렷한 감소 추세를 보이고 있지는 않다. 앞서 언급한 바와 같이 감전사고의 경우 무너짐, 화재 및 폭발·파열과 함께 재해자 대비 사망자 비율이 높다는 사실에 근거하여, 중상해 재해의 사고사망 연계 차단을 위해서라도 부상자 감소를 위해 미래 전기에너지 환경 변화 및 산업구조와 연계하여 감전사고 예방 대책을 보완·수립할 필요성이 있다.

<표 II-13> 최근 10년간 감전재해 발생현황

구분	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
재해자(명)	394	330	329	351	312	385	327	341	346	320
사망자(명)	32	27	19	26	22	18	21	16	16	17
부상자(명)	362	303	310	325	290	367	306	325	330	303

5) 2013년 최대 32명, 2020년 및 2021년 최소 16명



[그림 II-6] 최근 10년간 감전 중대재해 발생현황

(2) 특성

다음 <표 II-14>와 <표 II-15>는 최근 10년간 발생 형태별 구분에서 감전 사고 사망자와 부상자의 비중을 각각 나타내고 있다. 여기서 감전 부상자 비중은 발생형태 별 구분에서 아주 낮은 편이나, 감전 사망자 비중은 넘어짐, 화재, 폭발·파열 및 화학물질과 유사한 수준으로 확인되었다. 즉, 감전사고는 발생빈도는 낮으나 강도가 높은 편으로 화재, 폭발·파열 및 화학물질 발생형태 그룹과 유사한 양상을 보인다.

〈표 II-14〉 최근 10년간 감전사고 사망자수 비중

구분	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
계	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
떨어짐	35.1%	39.6%	39.5%	41.2%	40.7%	41.5%	43.3%	40.0%	45.5%	40.4%
넘어짐	3.0%	2.8%	1.9%	2.8%	3.0%	2.8%	2.2%	2.1%	2.2%	3.9%
칼림뒤집힘	7.7%	8.3%	8.0%	8.0%	6.6%	7.5%	8.4%	7.8%	7.0%	6.6%
부딪힘	8.5%	10.3%	11.2%	11.4%	11.1%	10.1%	10.5%	8.8%	9.3%	11.5%
물체에맞음	8.3%	7.0%	6.9%	7.3%	7.3%	6.1%	6.1%	8.6%	6.7%	7.2%
무너짐	4.8%	4.9%	4.0%	4.4%	6.6%	5.0%	3.9%	4.1%	4.2%	5.3%
끼임	13.1%	12.1%	14.1%	11.5%	11.3%	12.5%	13.2%	11.9%	12.3%	11.3%
절단베임찢림	0.1%	0.1%	0.5%	0.5%	0.4%	0.2%	0.5%	0.1%	0.6%	0.3%
감전	3.2%	2.9%	2.2%	2.9%	2.4%	2.0%	2.6%	1.9%	2.1%	2.1%
폭발파열	3.9%	2.6%	2.8%	1.6%	2.3%	2.0%	2.9%	3.2%	3.4%	3.4%
화재	2.1%	2.2%	3.0%	2.1%	2.1%	4.0%	1.7%	5.6%	2.3%	2.3%
불균형 등	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%
이상온도	1.1%	1.0%	0.5%	0.6%	0.6%	0.7%	0.5%	0.2%	0.1%	0.3%
화학물질	1.8%	1.6%	2.1%	1.5%	1.0%	1.5%	1.2%	1.1%	0.9%	2.3%
기타 ⁶⁾	7.1%	4.5%	3.4%	4.3%	4.6%	4.2%	3.0%	4.5%	3.2%	3.1%

6) 산소결핍, 빠짐익사, 사업장내 교통사고, 체육행사 등의 사고, 폭력행위, 동물상해, 기타

〈표 II-15〉 최근 10년간 감전사고 부상자수 비중

구분	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
계	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
떨어짐	17.2%	17.9%	18.2%	18.7%	18.6%	18.1%	16.9%	16.6%	15.5%	14.5%
넘어짐	22.0%	20.3%	20.1%	20.3%	21.4%	22.2%	22.5%	23.8%	25.1%	25.3%
칼림뒤집힘	3.5%	3.1%	3.0%	2.9%	2.8%	2.5%	2.5%	2.5%	2.6%	2.8%
부딪힘	7.3%	8.6%	8.6%	8.9%	8.7%	8.5%	8.8%	8.6%	8.6%	9.3%
물체에맞음	9.4%	9.2%	9.2%	9.2%	8.7%	8.4%	8.3%	8.3%	8.8%	8.3%
무너짐	0.9%	0.7%	0.6%	0.5%	0.5%	0.6%	0.7%	0.6%	0.5%	0.5%
끼임	18.4%	18.6%	17.3%	16.9%	16.4%	15.3%	14.6%	14.8%	14.3%	13.5%
절단베임찔림	9.6%	9.9%	11.2%	10.9%	11.4%	11.5%	12.0%	11.9%	11.6%	10.6%
감전	0.5%	0.4%	0.4%	0.4%	0.4%	0.4%	0.4%	0.4%	0.4%	0.3%
폭발파열	0.5%	0.4%	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%	0.2%	0.3%
화재	0.4%	0.5%	0.4%	0.4%	0.3%	0.4%	0.3%	0.3%	0.3%	0.2%
불균형 등	3.4%	3.8%	4.0%	3.7%	3.5%	4.5%	5.1%	5.0%	5.9%	7.2%
이상온도	3.0%	3.3%	3.5%	4.0%	4.3%	4.4%	4.6%	4.2%	4.1%	4.3%
화학물질	0.4%	0.4%	0.4%	0.4%	0.3%	0.4%	0.4%	0.4%	0.3%	0.4%
기타 ^가)	3.3%	3.0%	2.8%	2.5%	2.4%	2.6%	2.7%	2.1%	1.8%	2.5%

7) 산소결핍, 빠짐익사, 사업장내 교통사고, 체육행사 등의 사고, 폭력행위, 동물상해, 기타

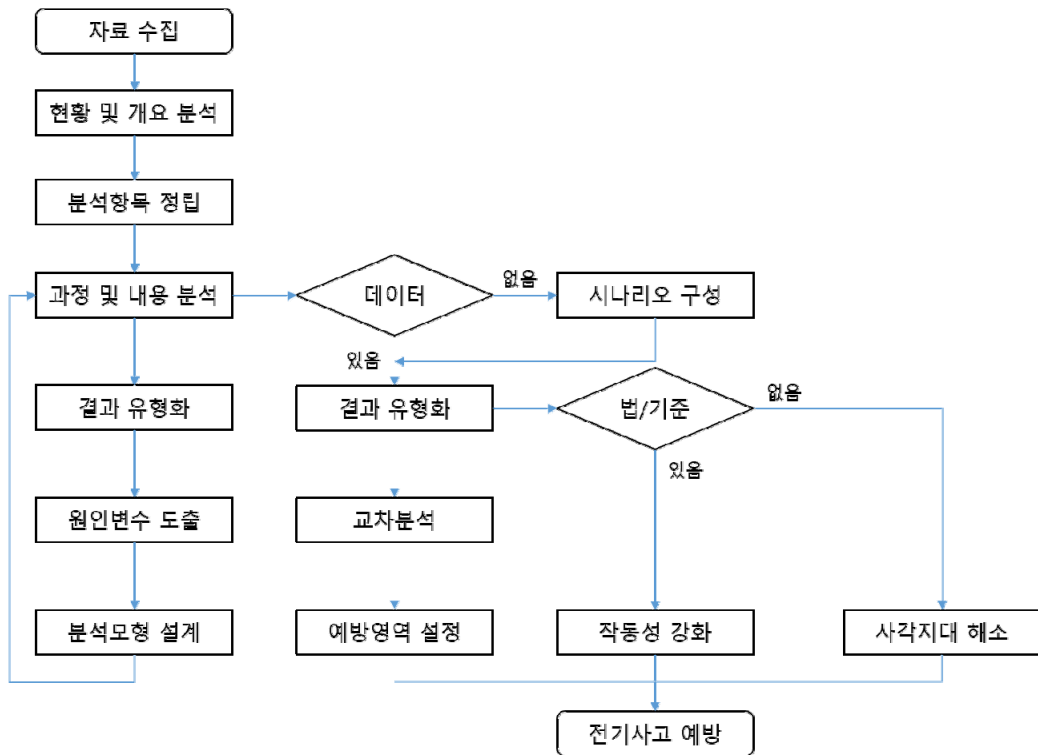
2) 분석 대상 및 방법

(1) 분석 대상

고용노동부 산업재해 통계에서 최근 10년간(2013년~2022년) 발생한 감전 중대재해를 대상으로 조사의견서를 추출하여 확인 및 분석하였다.

(2) 분석 방법

최근 10년간(2013년~2022년) 발생한 감전 중대재해 조사의견서의 분석 방법 및 절차는 다음 [그림 II-7]과 같다.



[그림 II-7] 중대재해 조사의견서 분석 방법 및 절차

먼저 산업재해통계를 통해 수집한 자료(조사의견서)를 기반으로 감전 중대 재해 발생 현황 및 개요를 파악하였다. 그리고 현황 및 개요를 기반으로 심층 분석을 통해 조사의견서 분석 항목을 정립하고, 정립한 분석 항목을 토대로 다시 조사의견서에서 재해발생 과정 및 내용을 분석하여 그 결과를 유형화 한다.

그리고 1차 분석결과를 토대로 감전재해 발생 관련 주요 원인변수를 도출하여 감전 매커니즘(Mechanism)을 토대로 분석모형을 설계하고, 분석모형을 활용하여 감전 중대재해 조사의견서를 2차로 분석하였다.

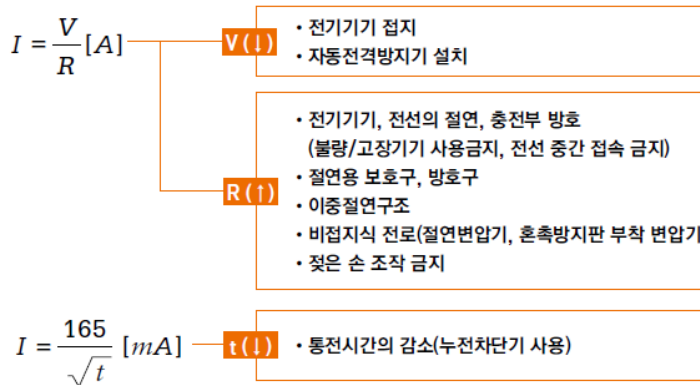
이때 분석 과정에서 조사의견서에 존재하지 않는 데이터는 전문가 자문을 토대로 시나리오로 구성하고 예측·분석한다.

마지막으로 분석 결과를 토대로 분석 항목별 교차분석을 토대로 감전재해 예방 영역을 설정하고, 발생원인 및 재발방지 대책을 토대로 현재의 법·기준 및 제도와의 비교를 통해 사각지대 발굴하여 개선 방안을 도출한다. 또한 현재의 법·기준 및 제도 관리영역에 있더라도 감전 사고사망 예방을 위해 회색지대도 발굴하여 현장 작동성 향상 방안도 검토한다.

3) 감전 매커니즘 기반 조사의견서 분석 모형

(1) 감전 매커니즘(Mechanism)

감전 재해예방의 기본원리는 다음 [그림 II-8]과 같다. 여기서 인체 감전 매커니즘에서는 옴의 법칙이 적용되는데, 감전은 인체에 흐르는 전류량에 의해 결정되고 인체 통전전류(I)의 크기는 인체의 인가 전압(V)과 인체 저항(R)에 따라 결정된다. 그리고 감전재해를 예방하기 위해서는 인체에 흐르는 전류(I)를 감소시키면 되는데 이때 전류(I)는 저항(R)과 반비례하고 전압(V)과 비례하므로, 저항을 높이고(절연보호구 착용 등) 전압을 줄이면(자동전격방지기 등) 감전재해를 예방할 수 있다.

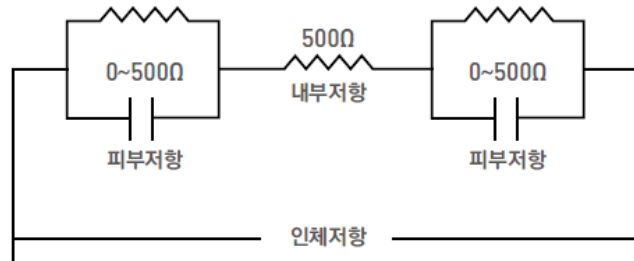


[그림 II-8] 감전 재해예방의 기본원리

첫 번째, 전격(Electrical Shock)에 의한 위험도는 통전전류의 크기에 의하여 결정되며, 이 전류는 옴의 법칙에서 전압을 접촉전압으로 고려했을 경우 인체의 전기저항에 따라서 결정된다.

두 번째, 인체의 저항은 피부저항과 내부저항의 합으로 나타내며, 전압의 크기에 따라 변화되지만, 상용전압 기준으로 약 1,000Ω 정도로 보고 있으며, 피부가 건조한 경우 이보다 20배 정도 증가한다. 또한 신체가 물에 젖은 경우 이보다 약 20배 정도 감소한다. 여기서 인체 피부 저항의 경우 다음 [그림 II-9]와

같이 용량성 성분과 저항성 성분으로 구분할 수 있는데, 직류감전의 경우 용량성 성분으로 인해 인체 저항값이 변화한다.



[그림 II-9] 인체저항 구성도

세 번째, 인체의 2개소 이상이 전위차가 있는 외부 도체에 접촉되면 인체를 통해서 전류가 흐르는 현상을 감전이라고 하며, 사람의 심장은 스스로 작동하는 것이 아니라 숨골에서 자율신경계통을 통해 수십 μA 의 미소한 전류의 Pulse 신호를 받을 때마다 한 번씩 뛰게 되어 있는데, 어느 정도 이상의 통전전류가 심장 부근을 통해 흐르면 심장의 박동 신호가 방해받기 때문에 심장은 아주 짧은 주기로 불규칙한 운동을 하게 되는데 이 현상을 심실세동이라고 한다. 이러한 심실세동은 심부전으로 이어지게 되면 사망사고가 발생할 수 있으며, 독일의 달지엘(Dalziel)은 다음 식과 같이 심실세동 전류를 정의하였다.

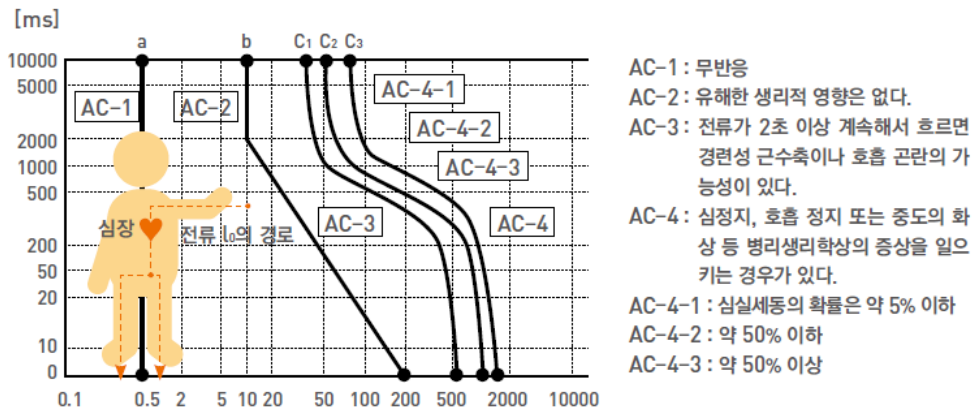
$$I = \frac{165}{\sqrt{t}} [mA] \quad [t: \text{감전시간(초)}]$$

위의 식에서 인체의 통전전류의 크기는 충전부 접촉시간과 비례하므로 통전 시간을 낮추면 인체에 흐르는 전류의 크기도 감소시킬 수 있으며 일상생활에서 대표적으로 적용되고 있는 사례로 감전 방지용 누전차단기(동작시간 : 0.03초)를 들 수 있다.






또한, 감전전류가 인체저항을 통해 흐르면 그 부위에는 다음과 같은 식의 열이 발생하는데 이 열에 의해서도 화상을 입고 세포 조직이 파괴된다.

$$P = I^2 R [W] = I^2 R [J/s] = 0.24 I^2 R [cal/s]$$

네 번째, 감전 시 인체 반응은 국제 전기표준회의(IEC: International Electro technical Commission)의 IEC60479-1에서 다음 그림과 같이 규정하고 있다. 그리고 다음 그림은 인체를 통해 교류전류(주파수: 15Hz~100Hz)가 흘렀을 때의 인체 반응을 나타낸 것으로 교류전류의 인체 통전 시 약 1mA의 전류로 신체가 저린 느낌을 받을 수 있고, 10mA 이상의 전류가 2초 이상 흐르면 경련성 근육 수축이나 호흡 곤란을 일으킬 가능성은 높다. 또한 50mA 이상의 전류가 1초 이상 흐르면 심실세동을 일으킬 가능성도 있다.



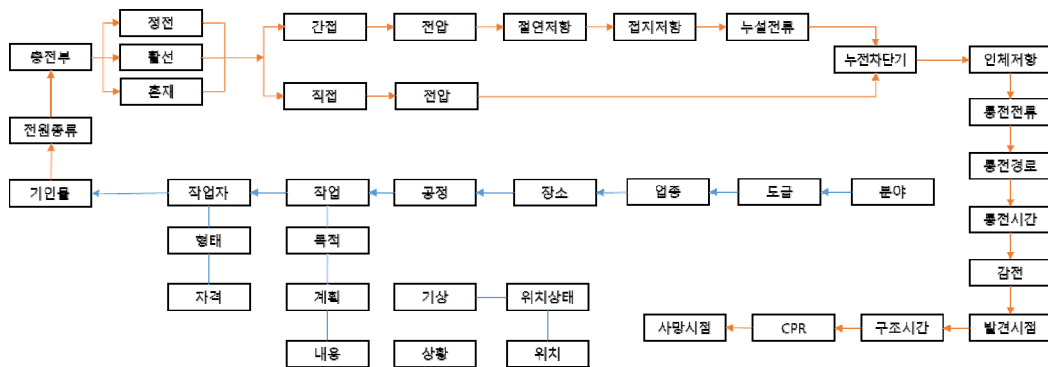
[그림 II-10] IEC 60479-1에 따른 인체반응 영역

통과 전류의 크기	1mA	5mA	10mA	15mA	50~100mA
증상	 약간 느낄 정도	 경련을 일으킨다	 불쾌해진다	 강렬한 경련을 일으킨다	 치사

[그림 II-11] 통전전류에 따른 인체반응

(2) 감전 중대재해 조사의견서 분석 모형 설계

최근 10년간(2013년~2022년) 발생한 감전 중대재해 조사의견서 분석을 위한 모형을 다음 [그림 II-12]와 같이 설계하였다. 그리고 분석모형은 감전 발생 매커니즘을 토대로 단계별 영향 요인 변수 등을 추가로 고려하였다. 즉, 작업자, 충전부, 공정·설비 및 안전조치 사항 등을 고려하였다.



[그림 II-12] 감전 매커니즘 기반 분석 모형

4) 분석결과

(1) 감전 중대재해 발생 현황 분석

가) 분야

최근 10년간(2013년~2022년) 감전 중대재해 발생 현황을 다음 <표 II-16>과 같이 분야별(건설, 건설외)로 구분하였다. 건설 분야에서 108건, 건설외 분야에서 78건이 각각 발생하여 건설외 분야보다는 건설 분야가 약 1.4배 높았다.

무엇보다도 산업별 규모를 고려한 감전 중대재해 발생 현황에 대한 비교가 중요하지만, 선행연구 분석 및 문헌 고찰 등을 고려한다면 작업환경이 열악하고 공정 등이 수시로 변화되는 건설업에서 감전 중대재해 발생비율이 높다고 추정할 수 있다.

〈표 II-16〉 분야별 감전 중대재해 발생현황

구분	계	건설	건설외
분야	186	108	78

나) 도급

최근 10년간(2013년~2022년) 감전 중대재해 발생 현황을 다음 〈표 II-17〉과 같이 도급 여부별(n차)로 구분하였다. 도급 사업장에서 감전 중대재해는 약 31.2% 정도 발생하였으며, 도급 사업장 58개소 중 건설업 비중이 45개소로 건설업 특성상 도급 비중이 높고, 중소기업도 도급 사업장의 안전관리가 취약한 상황을 고려한다면 건설업의 도급 사업장에 대한 안전관리를 강화할 필요성이 있다.

〈표 II-17〉 도급 여부별 감전 중대재해 발생현황

구분	계	1차	2차	3차 이상	비적용
도급	186	52	4	2	128

다) 업종

① 업종별

최근 10년간(2013년~2022년) 감전 중대재해 발생 현황을 다음 〈표 II-18〉과 같이 업종별로 구분하였다.

업종별 감전 중대재해 발생 현황 분석에서 건설업과 제조업의 경우 감전 위험성을 인식하고 있으며, 관련 안전조치 사항 등이 마련되어 있다. 그러나 기타의사업에서의 감전 중대재해 발생 정도는 건설업과 제조업과 비교하여 크지는 않지만, 기타의사업의 발생 비중이 제조업의 약 56%로 업종에 적합한 감전사고 예방을 위한 위험성평가 또는 안전관리 방안도 필요하다.

〈표 II-18〉 업종별 감전 중대재해 발생현황

구분	계	건설업	제조업	기타의사업	운수·창고 및 통신업
업종	186	105	44	25	5
구분	광업	전기·가스·증기 및 수도사업	임업	개인	지자체
업종	2	2	1	1	1

② 제조업-중업종

최근 10년간(2013년~2022년) 감전 중대재해 발생 현황을 다음 〈표 II-19〉과 같이 제조업의 (중)업종별로 구분하였다. 제조업의 (중)업종별 감전 중대재해 발생 현황 분석에서는 업종별 작업조건 등 특성을 고려하면 중대재해 발생 형태별 비중이 다양할 수 있으며, 감전 중대재해는 기계기구·금속·비금속광물제품 제조업, 화학및고무제품제조업 등에서 26건으로 약 60%이상 발생하고 있다. 또한 선박건조및수리업은 작업환경 및 작업조건 특성상 건설업과도 유사한 경우로 감전 중대재해 발생 위험성이 높을 수 있으나, 최근 10년간 발생 건수는 2건에 불과하다는 특이점이 있다.

〈표 II-19〉 제조업 중업종별 감전 중대재해 발생현황

중업종	건수
계	44
기계기구·금속·비금속광물제품 제조업	18
화학및고무제품제조업	8
섬유및섬유제품제조업	5
식료품제조업	4
전기기계기구·정밀기구·전자제품제조업	3
선박건조및수리업	2
목재및종이제품제조업	2
의약품·화장품·연탄·석유제품 제조업	1
수제품및기타제품제조업	1

③ 건설업-도급인 공사종류

최근 10년간(2013년~2022년) 감전 중대재해 발생 현황을 건설업 도급인의 공사 종류별로 다음 <표 II-20>과 같이 정리하였다.

<표 II-20> 건설업 도급인의 공사종류별 감전 중대재해 발생현황

공사종류	건수	공사종류	건수
계	105	수자원시설(하천, 수로, 상하수도, 정수장 등)	2
설비, 전기, 통신, 소방	29	택지조성, 간척공사, 매립공사, 공원조성, 관로공사	1
기타 건축공사	14	도로	1
플랜트	9	비적용	1
근린생활시설	8	학교	1
업무시설	5	종교시설	1
아파트	4	주상복합	1
기타 토목	3	자료없음	25

④ 건설업-도급인 작업공종

최근 10년간(2013년~2022년) 감전 중대재해 발생 현황을 건설업 도급인의 작업 공종별로 다음 <표 II-21>과 같이 정리하였다. 여기서 감전 중대재해 발생 특성상 설비/전기/통신공사에서의 발생비율이 약 40%로 가장 높다.

<표 II-21> 건설업 도급인의 작업공종별 감전 중대재해 발생현황

작업공종	건수	작업공종	건수
계	105	철거공사	7
설비(E/V 포함)/전기/통신공사	41	조경/부대토목 공사	2
기타	12	토목(터파기/파일 등) 공사	1
구조물공사	8	비적용	1
내/외부 마감공사	7	자료없음	26

㉔ 건설업-수급인 공사종류

최근 10년간(2013년~2022년) 감전 중대재해 발생 현황을 건설업 수급인의 공사 종류별로 다음 <표 II-22>와 같이 정리하였다.

<표 II-22> 건설업 수급인의 공사 종류별 감전 중대재해 발생현황

공사종류	건수	공사종류	건수
계	105	농업용수 개발	1
전기공사	23	철골공사	1
철거공사	2	창호공사	1
통신공사	2	거꾸집조립해체공사	1
비계조립해체공사	2	미장공사	1
전기계장공사	1	간판 교체공사	1
목공사	1	하수관로공사	1
지붕공사	1	흙막이공사	1
배관공사	1	가설공사	1
인테리어공사	1	소방전기공사	1
배수암거공사	1	비적용	60

㉕ 건설업-수급인 전문업종

최근 10년간(2013년~2022년) 감전 중대재해 발생 현황을 건설업 수급인의 전문업종별로 다음 <표 II-23>과 같이 정리하였다.

<표 II-23> 건설업 수급인의 전문업종별 감전 중대재해 발생현황

전문업종	건수	전문업종	건수
계: 105			
전기공사업	11	조형물제조업	1
일반건설공사업	9	철근콘크리트공사업	1
일반전기공사업	9	기계설비공사업	1
기타건설공사업	4	토공사업	1
비계구조물해체공사업	2	전기설비업	1
정보통신공사업	2	개인	1
건설업	2	비적용	60

라) 장소

① 사업장

최근 10년간(2013년~2022년) 감전 중대재해 발생 현황을 사업장별로 다음 <표 II-24>와 같이 정리하였다.

<표 II-24> 사업장별 감전 중대재해 발생현황

구분	계	공사현장	사업장내	사업장외
사업장	186	76	58	52

② 장소

최근 10년간(2013년~2022년) 감전 중대재해 발생 현황을 사업장의 장소 별로 다음 <표 II-25>와 같이 정리하였다.

<표 II-25> 사업장 장소별 감전 중대재해 발생현황

구분	계	공사현장	사업장내
계	186	전기시설	58
건물(공장외)	63	구조물	3
건물(공장)	58	철도	2
도로	29	바다	1
옥외	14	기타	2

③ (중)장소

최근 10년간(2013년~2022년) 감전 중대재해 발생 현황을 사업장의 (중)장소 별로 다음 <표 II-26>과 같이 정리하였다.

<표 II-26> 사업장 (중)장소별 감전 중대재해 발생현황

(중)장소	건수	(중)장소	건수
계: 186			
전기설비	54	건설	5
제조	35	선박	3
건물시설	28	철로	2
전기실	24	구조물	2
고소	21	건설장비	1
지상	7	기타	3

마) 공정

최근 10년간(2013년~2022년) 감전 중대재해 발생 현황을 공정별로 다음 <표 II-27>과 같이 정리하였다.

<표 II-27> 공정별 감전 중대재해 발생현황

구분	계	공사현장	사업장내
계	186	비계 설치	3
전기설비 유지보수	48	전기설비 시운전	3
시설물 유지보수	20	전기설비 해체	3
건설공사	19	선박 유지보수	2
생산설비 유지보수	19	승강기 유지보수	2
전기설비 설치	19	조경공사	2
생산	12	전기설비 검사	2
전기설비 교체	8	시설물 교체	1
시설물 설치	6	전차 유지보수	1
통신설비 유지보수	6	통신설비 설치	1
비계 해체	5	기타	4

바) 작업

① 목적

최근 10년간(2013년~2022년) 감전 중대재해 발생 현황에서 다음 <표 II-28>과 같이 전기작업보다는 비전기작업에서 더 많이 발생하고 있다. 비전기작업임에도 불구하고 감전 중대재해 발생비율이 전기작업보다는 높은 이유는 전기작업과 무관하다고 판단하여 공정·작업 및 기계·설비 대상 전기안전 분야 위험성평가와 사전 안전조치가 충분히 이행되지 않기 때문이다.

<표 II-28> 작업목적별 감전 중대재해 발생현황

구분	계	전기작업	비전기작업
작업 목적	186	89	97

② 계획

최근 10년간(2013년~2022년) 감전 중대재해 발생 현황에서 다음 <표 II-29>과 같이 계획작업이 175건, 비계획 작업이 11건이다. 이는 계획작업임에도 불구하고 전기안전 분야에 대한 위험성평가 및 사전 안전조치 사항이 충분히 이행되지 않고 있음을 반증한다. 만약, 계획작업의 경우 사전 위험성평가를 통해 전기 위험성을 파악하여 사전에 안전조치 사항이 이행되었더라면 감전 중대재해 발생 가능성은 더 낮아질 것이다.

<표 II-29> 작업계획별 감전 중대재해 발생현황

구분	계	계획	비계획
작업 계획	186	175	11

③ 내용

최근 10년간(2013년~2022년) 감전 중대재해 발생 현황을 작업 내용별로 다음 <표 II-30>과 같이 정리하였다.

<표 II-30> 작업내용별 감전 중대재해 발생현황

구분	건수	구분	건수
계	186	생산설비 수리	3
전기설비 연결	41	전기설비 조정	3
전기설비 점검	21	전기설비 해체	3
전기설비 분리	19	철근 가공	3
생산작업	12	도장공사	2
청소	11	생산설비 점검	2
이동	7	시설물 수리	2
시설물 설치	6	시설물 해체	2
비계 해체	5	절단	2
용접	5	중량물 운반	2
전기설비 청소	5	천공/파쇄	2
방수공사	4	통신장비 설치	3
비계 조립	4	통신설비 점검	2
수목작업	4	생산설비 조립	1
자재 취급	4	기타	3
배수작업	3	-	-

④ 위치

최근 10년간(2013년~2022년) 감전 중대재해 발생 현황을 작업 위치별로 다음 <표 II-31>과 같이 정리하였다.

<표 II-31> 작업위치별 감전 중대재해 발생현황

구분	건수	구분	건수
계	186	수변전반	4
수변전설비	28	공사자재	3
생산설비	24	선박	3
대지	17	시설물	3
고소작업대	14	이동식크레인	3
비계	13	가전제품	2
전주	12	공사현장	2
사다리	11	승강기	2
배분전반	10	유틸리티	2
전기설비	7	전차	2
천장	7	기타	1
송전탑	5	수목	1
건축물	4	용접기	1
구조물	4	크레인	1

5 형태

최근 10년간(2013년~2022년) 감전 중대재해 발생 현황을 작업 형태별로 다음 <표 II-32>와 같이 정리하였다. 여기서 작업 형태는 대상 작업에 대한 작업 근로자수를 말한다.

<표 II-32> 작업형태별 감전 중대재해 발생현황

구분	계	공사현장	사업장내
계	186	3인	8
1인	142	4인	7
2인	27	6인	2

6 작업자

최근 10년간(2013년~2022년) 감전 중대재해 발생 현황을 작업자 직종별로 다음 <표 II-33>과 같이 정리하였다.

<표 II-33> 작업자 직종별 감전 중대재해 발생현황

구분	계	전기작업자	비전기 작업자	혼재	자료없음
작업자 직종	186	75	105	1	5

최근 10년간(2013년~2022년) 감전 중대재해 발생 현황을 작업자 자격 보유 별로 다음 <표 II-34>와 같이 정리하였다.

<표 II-34> 작업자 자격보유별 감전 중대재해 발생현황

구분	계	유자격자	무자격자	자료없음	비적용
작업자 자격	186	45	7	124	10

사) 감전

① 발생형태

최근 10년간(2013년~2022년) 감전 중대재해 발생 현황을 발생 형태별로 다음 <표 II-35>와 같이 정리하였다.

<표 II-35> 발생형태별 감전 중대재해 발생현황

구분	계	충전부 감전	누설전류 감전	아크감전 (접촉)	기타	상세정보 부족
발생형태	186	121	36	19	9	1

② 접촉형태

최근 10년간(2013년~2022년) 감전 중대재해 발생 현황을 접촉 형태별로 다음 <표 II-36>과 같이 정리하였다.

<표 II-36> 접촉형태별 감전 중대재해 발생현황

구분	계	직접접촉	간접접촉	자료없음
접촉형태	186	141	44	1

최근 10년간(2013년~2022년) 감전 중대재해 발생 현황을 아크발생 여부별로 다음 <표 II-37>과 같이 정리하였다.

<표 II-37> 아크발생 여부별 감전 중대재해 발생현황

구분	계	발생	미발생
아크발생	186	52	134

③ 전원차단

최근 10년간(2013년~2022년) 감전 중대재해 발생 현황을 전원 차단 여부별로 다음 <표 II-38>과 같이 정리하였다.

작업 목적성(전기작업 또는 비전기작업)을 고려하여 전원 차단 여부를 결정하게 되는데, 전기작업에서는 정전 및 활선작업 절차 마련 및 이행 수준이 양호한 편이나, 비전기작업에서도 전원 미차단시 정전 및 활선작업의 안전작업 절차에 대한 고려가 필요함에도 불구하고, 충전부에 대한 접근한계거리 준수 또는 절연 방호조치가 현장에서는 이행되지 않고 있다.

<표 II-38> 전원차단 여부별 감전 중대재해 발생현황

구분	계	차단	미차단	혼재
전원차단	186	15	169	2

④ 활선상태

최근 10년간(2013년~2022년) 감전 중대재해 발생 현황을 활선상태별로 다음 <표 II-39>와 같이 정리하였다.

감전 중대재해가 발생하였다는 것은 충전부가 존재하는 활선상태라는 것이 전제된다. 그러나 산업현장에서는 정전작업인 경우에도 중대재해가 발생하는 이유는 활선과 정전, 그리고 혼재에 대한 정의가 불분명하기 때문이다.

<표 II-39> 활선상태별 감전 중대재해 발생현황

구분	계	활선	혼재
활선상태	186	172	14

⑤ 기인물

최근 10년간(2013년~2022년) 감전 중대재해 발생 현황을 기인물별로 다음 <표 II-40>과 같이 정리하였다.

<표 II-40> 기인물별 감전 중대재해 발생현황

구분	건수	구분	건수
계	186	변성기류	3
케이블/전선류	61	콘센트	2
제조장비/설비	50	애자류	2
차단기/개폐기류	21	가전기기	2
변압기류	18	피뢰기	1
배분전반	11	조명기구	1
이동용전기기기	7	배터리	1
지시물/방호설비	4	기타	2

최근 10년간(2013년~2022년) 감전 중대재해 발생 현황을 기인물의 세부 충전부별로 다음 <표 II-41>과 같이 정리하였다.

<표 II-41> 기인물의 세부 충전부별 감전 중대재해 발생현황

구분	건수	구분	건수
총 합계	186	점퍼선	2
전선	67	차단기	2
외함	29	피뢰기	2
단자대	28	홀더	2
COS	12	CT	1
자료없음	9	애자	1
부스바	6	애자 핀	1
BUS BAR	5	전력퓨즈	1
심선	3	접지선	1
접속부	3	클램프	1
케이블	3	트롤리바	1
용접기	2	휴즈	1
전동기	2	히터	1

⑥ 총전부 발생원인

최근 10년간(2013년~2022년) 감전 중대재해 발생 현황을 총전부 발생 원인별로 다음 <표 II-42>와 같이 정리하였다.

<표 II-42> 총전부 발생원인별 감전 중대재해 발생현황

구분	건수	구분	건수
계	186	역송전	2
전원 미차단	70	전원 재투입	3
절연파괴	32	유도전압	2
절연 미실시	27	정상작업	1
절연손상	26	3상 단락	1
활선상태 접촉	18	전원 불시투입	1
역송전	3	자료없음	1

최근 10년간(2013년~2022년) 감전 중대재해 발생 현황을 총전부 접촉사유별로 다음 <표 II-43>과 같이 정리하였다. 여기서 총전부 근접은 총전부를 인식하고 있음에도 불구하고 작업 현장의 다양한 제약조건으로 인해 접근이 불가피한 경우이며, 정전 판단은 활선 및 정전 혼재 시 발생한 경우이다.

<표 II-43> 총전부 접촉사유별 감전 중대재해 발생현황

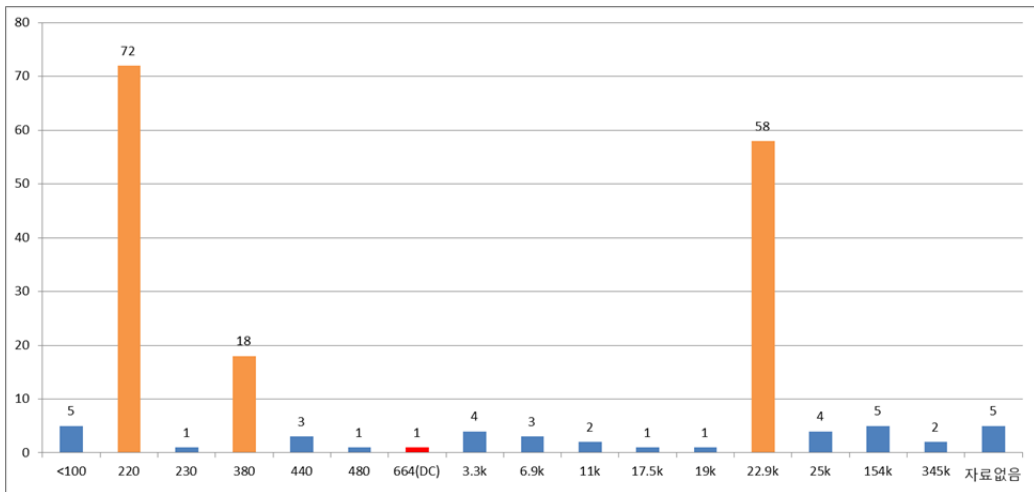
구분	계	총전부 근접	정전 판단	차단 오류
총전부 접촉사유	70	53	15	2

⑦ 감전전압

- 감전전압 분석 결과 다음 <표 II-44> 및 [그림 II-13]과 같이 220V와 380V에서 90건, 22.9kV에서 58건의 감전 중대재해가 각각 발생하였다. 상대적으로 저압과 고압 이상의 비교에서는 저압이 101건, 고압 이상이 80건 및 ‘자료 없음’이 5건으로 상대적으로 고압 이상보다는 저압에서 감전 중대재해가 더 많이 발생하고 있다.

<표 II-44> 감전전압(크기)별 중대재해 발생현황

감전전압(V)	건수	감전전압(V)	건수
계	186	440	3
220	72	11k	2
22.9k	58	345k	2
380	18	230	1
<100	5	17.5k	1
154k	5	664	1
3.3k	4	19k	1
25k	4	480	1
6.9k	3	자료없음	5



[그림 II-13] 감전전압(크기)별 중대재해 발생현황

- 접촉전압 분석 결과 다음 <표 II-45>와 같이 대지전압이 167건, 선간 전압이 12건, 자료 없음 5건 및 비적용 2건이 각각 발생하였다.

<표 II-45> 접촉전압별 감전 중대재해 발생현황

구분	계	대지	선간	자료없음	비적용
접촉전압	186	167	12	5	2

㉘ 인체 통전형태

최근 10년간(2013년~2022년) 감전 중대재해 발생 현황을 인체 통전 형태 별로 다음 <표 II-46>과 같이 정리하였다.

<표 II-46> 인체 통전형태별 감전 중대재해 발생현황

구분	계	지락	단락	자료없음
통전형태	186	169	12	5

최근 10년간(2013년~2022년) 감전 중대재해 발생 현황을 인체 통전형태 별로 다음 <표 II-47>과 같이 정리하였다. 중대재해 조사의견서 확인 결과, 인체감전 특성상 인체저항에 대한 정확한 데이터가 부재한 상황으로 인해 자료가 없거나 인체 통전전류 계산 시 인체저항을 1,000옴 기준으로 판단하고 있었다. 그러나 인체저항은 신체조건, 작업환경 및 기상 상황에 따라 매우 다양하기 때문에 다양한 관점에서 인체 통전전류 값의 결정이 필요하다.

<표 II-47> 인체저항별 감전 중대재해 발생현황

구분	계	1000옴 미만	1000옴 이상	자료없음
인체저항	186	19	67	100

최근 10년간(2013년~2022년) 감전 중대재해 발생 현황을 인체 통전경로 별로 다음 <표 II-48>과 같이 정리하였다. 전체 186건 중 ‘비적용’ 또는 ‘자료 없음’을 제외한 118건에서는 손 접촉 비중이 80건으로 가장 높다.

<표 II-48> 통전경로별 감전 중대재해 발생현황

통전경로	건수	통전경로	건수
계	186	손→팔	1
손→다리	36	팔→얼굴	1
손→손	18	다리→팔	1
손→몸통	12	목→몸통	1
손→발	9	손→왼손	1
몸통→손	6	머리→몸통	1
팔→다리	4	얼굴→다리	1
몸통→다리	4	몸통→발	1
머리→손	3	머리→다리	1
발→손	3	손→얼굴	1
팔→발	2	손→머리	1
팔→몸통	2	손→오른손	1
머리→발	2	다리→다리	1
다리→손	2	비적용	2
다리→몸통	2	자료 없음	66

⑨ 사후조치

- 다음 <표 II-49>는 CPR 실시 여부별 감전 중대재해 발생 현황이다.

<표 II-49> CPR 실시여부별 감전 중대재해 발생현황

구분	계	실시	미실시	자료없음
CPR	186	39	3	144

- 다음 <표 II-50>은 사망 시점별 감전 중대재해 발생 현황이다.

<표 II-50> 사망시점별 감전 중대재해 발생현황

구분	계	즉시	치료중	비적용
사망시점	186	152	29	5

- 다음 <표 II-51>은 발견 시점별 감전 중대재해 발생 현황이다.

<표 II-51> 발견시점별 감전 중대재해 발생현황

구분	계	즉시	5분 경과
발견시점	186	138	48

- 다음 <표 II-52>는 구조 시점별 감전 중대재해 발생 현황이다.

<표 II-52> 구조시점별 감전 중대재해 발생현황

구분	계	즉시	10분경과	30분경과	1시간 경과
발견시점	186	178	2	5	1

(2) 산업안전보건기준에 관한 규칙 위반 조항 분석

중대재해 조사의견서에서 조사자가 재해 발생원인으로 규정한 산업안전보건 기준에 관한 규칙 조항을 다음 <표 II-53>과 같이 정리하였다.

<표 II-53> 산업안전보건기준에 관한 규칙 위반 조항

규칙 조항	계	건설외	건설
제32조(보호구의 제한적 사용)	25	11	14
제35조(관리감독자의 유해위험 방지 업무 등)	38	21	17
제36조(사용의 제한)	2	1	1
제38조(사전조사 및 작업계획서의 작성 등)	61	15	46
제43조(개구부 등의 방호 조치 등)	4	1	3
제59조(강관비계 조립 시의 준수사항)	3	0	3
제146조(크레인 작업 시의 조치)	1	0	1
제301조(전기 기계기구 등의 충전부 방호)	29	17	12
제302조(전기 기계기구의 접지)	38	26	12
제303조(전기 기계기구의 적정설치 등)	5	3	2
제304조(누전차단기에 의한 감전방지)	34	21	13
제306조(교류아크용접기 등)	4	4	0
제307조(단로기 등의 개폐)	1	1	0
제309조(임시로 사용하는 전등 등의 위험 방지)	1	1	0
제310조(전기 기계기구의 조작 시 등의 안전조치)	5	2	3
제313조(배선 등의 절연피복 등)	9	5	4
제316조(꽃음접속기의 설치사용 시 준수사항)	1	1	0
제317조(이동 및 휴대장비 등의 전기작업)	2	1	1
제318조(전기작업자의 제한)	1	0	1
제319조(정전전로에서의 작업)	74	30	44
제321조(충전전로에서의 전기작업)	60	18	42
제322조(충전전로 인근에서의 차량기계장치 작업)	7	0	7
제323조(절연용 보호구 등의 사용)	39	11	28

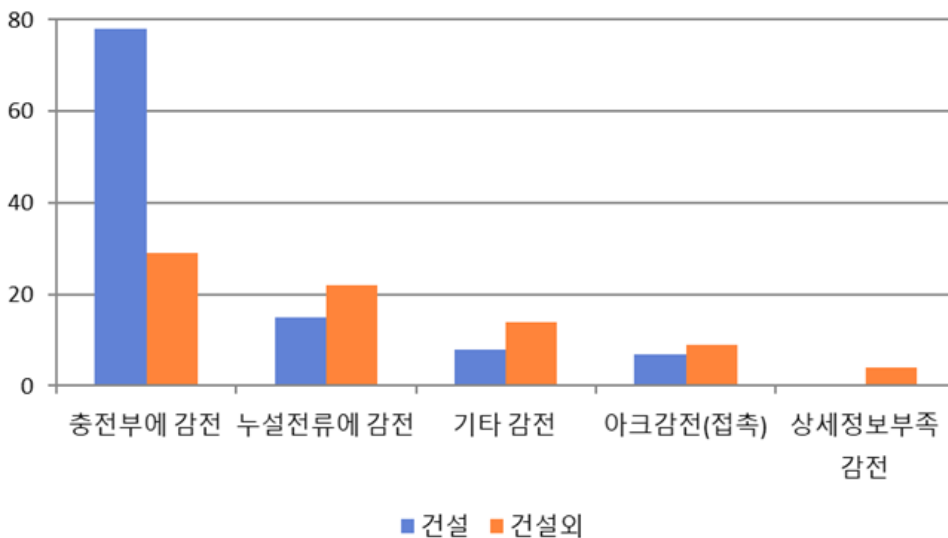
(3) 건설과 건설외 비교

가) 감전 중대재해 발생 형태

최근 10년간(2013년~2022년) 감전 중대재해를 다음 [그림 II-14]와 같이 건설과 건설외 업종을 발생 형태별로 비교하였다.

건설업과 건설외 외 비교 결과, 건설에서는 충전부에 감전 비율이 가장 높고, 건설 외에서는 다소 차이는 있지만 충전부에 감전, 누설전류에 감전 및 기타·아크 감전 등의 비율이 유사하다. 상대적으로 건설에서는 충전부에 감전 항목 비율 이외에는 누설전류에 감전 등 항목 비율이 건설 외 보다는 모두 낮다.

즉 건설에서는 직접접촉으로 분류되는 충전부에 감전 비중이 가장 높고, 건설 외에서는 직접접촉 비중이 높기는 하지만, 간접접촉으로 분류되는 누설전류에 감전 항목이 충전부에 감전 항목과 유사하게 높았다.

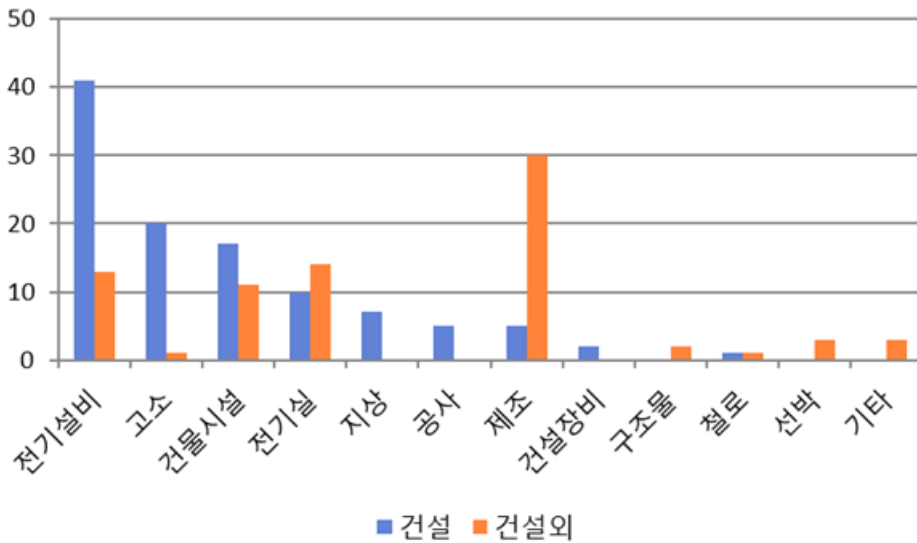


[그림 II-14] 발생 형태별 감전 중대재해 발생 비교 현황

나) 장소

최근 10년간(2013년~2022년) 감전 중대재해를 다음 [그림 II-15]와 같이 건설과 건설외 업종을 장소별로 비교하였다.

건설업과 건설외 외 비교 결과, 건설에서는 전기설비 항목에서, 건설외에서는 제조 장소 항목에서 감전 중대재해가 가장 많이 발생하였다. 여기서 건설외의 제조 장소는 해당 업종과 직접으로 관련되는 장소를 말한다. 그리고 건설의 경우 전기공사업이 건설업으로 분류되어 있어 전기설비에서 감전 사고사망 비율이 높은 것으로 확인되었다.

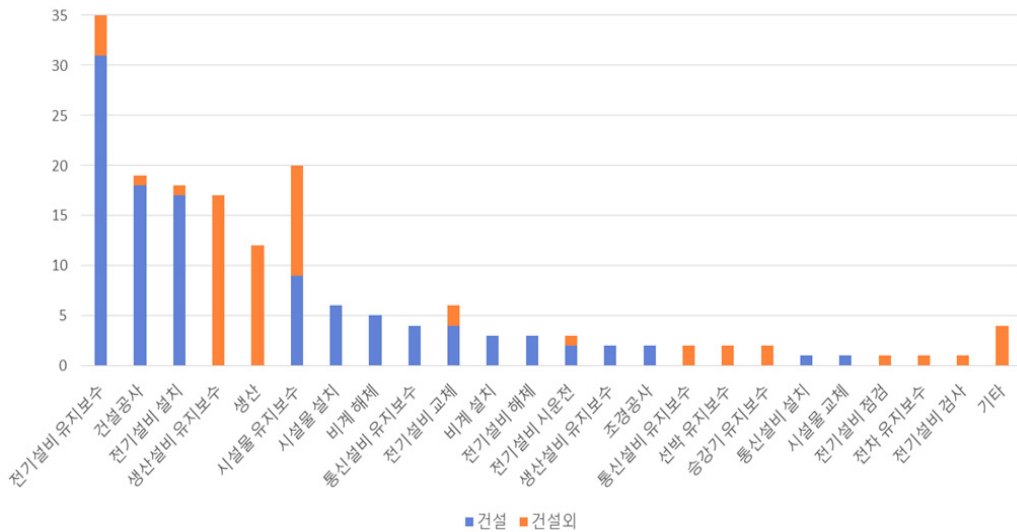


[그림 II-15] 장소별 감전 중대재해 발생 비교 현황

다) 공정

최근 10년간(2013년~2022년) 감전 중대재해를 다음 [그림 II-16]과 같이 건설과 건설외 업종을 공정별로 비교하였다.

건설업과 건설외 외 비교 결과, 건설에서는 전기설비의 유지보수, 건설공사 및 전기설비 설치 순으로 높다. 그리고 건설외에서는 생산설비 유지보수, 생산 및 유지보수 순으로 높다. 즉, 건설의 경우 전기공사 관련으로 건설외의 경우 전기를 직접적으로 취급하지 않는 제조 및 생산 공정에서 다수를 차지하고 있다. 따라서 건설과 건설외의 공정별 비교에서는 상반된 경향성을 보이기 때문에, 업종별로 구분된 안전조치가 필요할 것으로 판단된다.



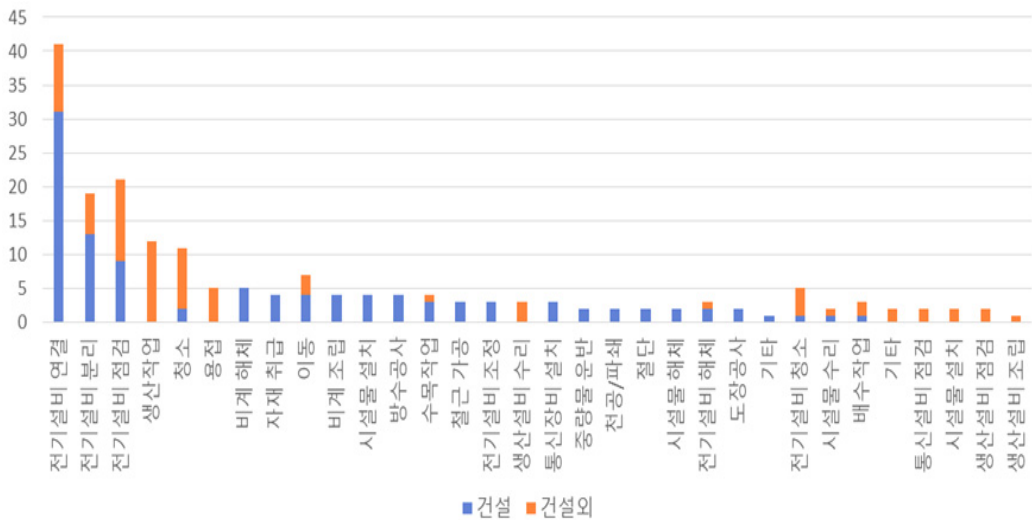
[그림 II-16] 공정별 감전 중대재해 발생 비교 현황

라) 작업

최근 10년간(2013년~2022년) 감전 중대재해를 다음 [그림 II-17]과 같이 건설과 건설외 업종을 작업별로 비교하였다.

건설업과 건설외 외 비교 결과, 건설에서는 전기설비의 연결, 분리 및 점검 순으로 높고, 건설외에서는 전기설비 점검, 생산 작업 및 청소 순으로 높다. 따라서 건설과 건설외의 공정별 비교에서는 상반된 경향성을 보이고 있기 때문에 업종별로 구분된 안전조치가 필요할 것으로 판단된다.

다만, 건설외에서도 전기관련 직접 작업에서 감전사고가 다수·반복적으로 발생하고 있으므로 업종에 특화된 안전조치 관련 검토가 필요한 부분이다.



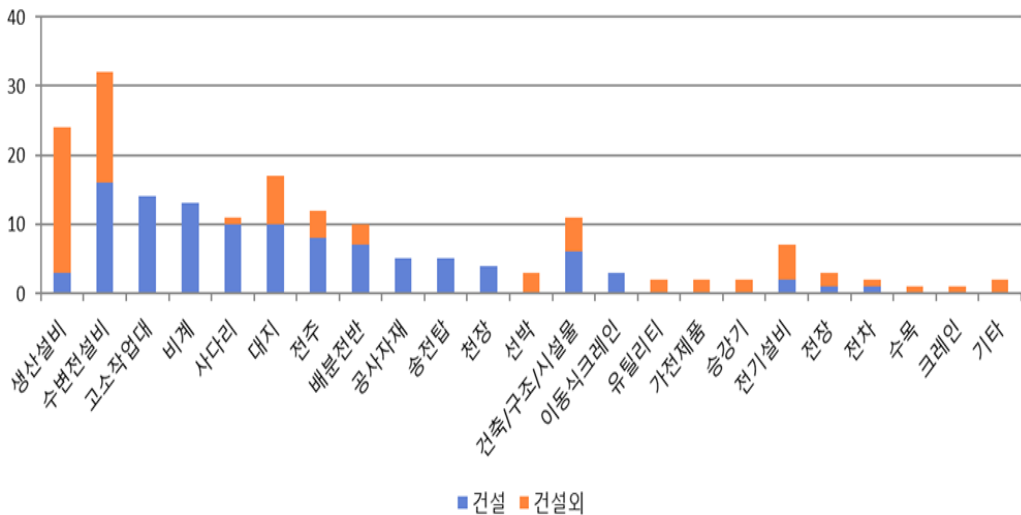
[그림 II-17] 작업별 감전 중대재해 발생 비교 현황

마) 작업위치

최근 10년간(2013년~2022년) 감전 중대재해를 다음 [그림 II-18]과 같이 건설과 건설외 업종을 작업위치별로 비교하였다.

건설업과 건설업 외 비교 결과, 건설에서는 수변전설비, 고소작업대, 비계 및 사다리 순으로 높다. 건설외에서는 생산설비, 수변전설비 및 건축/구조/시설물 순으로 높다. 즉, 건설과 건설외의 작업위치별 비교에서는 상반된 경향성을 보이고 있다.

다만, 건설외 업종에서 생산설비 관련 감전사고 사망자수 비중은 상당히 높은 편이다. 그러나 실제 제조 및 생산 공정에서의 위험성평가 시 감전 관련 평가 실시는 일반적 수준으로 이루어지고 있어, 제조/생산 설비에서의 감전 사고사망 예방을 위해서는 감전에 특화된 위험성평가 기법 마련이 필요하다.



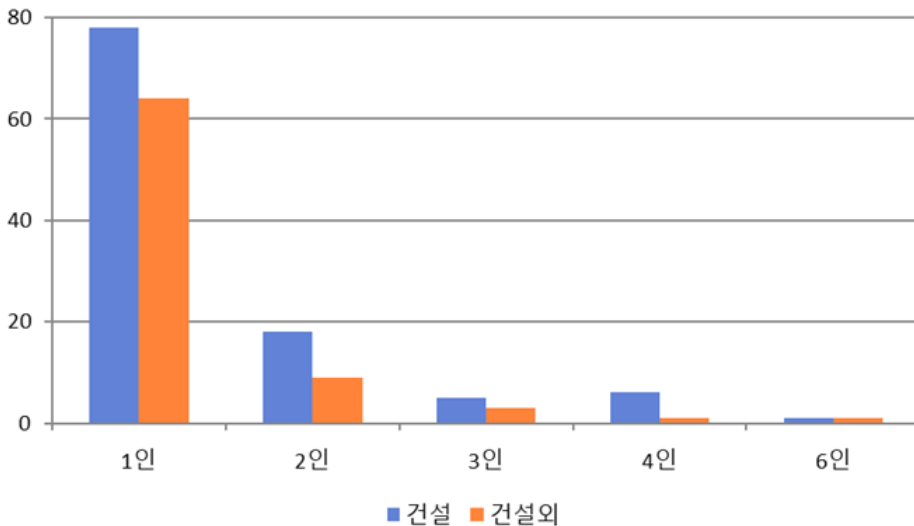
[그림 II-18] 작업위치별 감전 중대재해 발생 비교 현황

바) 작업자 수

최근 10년간(2013년~2022년) 감전 중대재해를 다음 [그림 II-19]과 같이 건설과 건설외 업종을 작업자수별로 비교하였다.

건설업과 건설업 외 비교 결과, 건설업과 건설업 외의 차이는 특별한 경향성을 보이지는 않는다. 즉, 감전 사고사망은 업종과 상관없이 대부분 1인 작업 시 발생하고 있다.

다만 다른 발생형태에서도 1인 작업 비중은 높지만, 특히 감전 사고사망의 경우 감전사고 발생 시 전원 차단 등 구조 및 구호 등 후속 조치가 중요하기 때문에 2인 1조 작업이 우선시 되어야 한다.



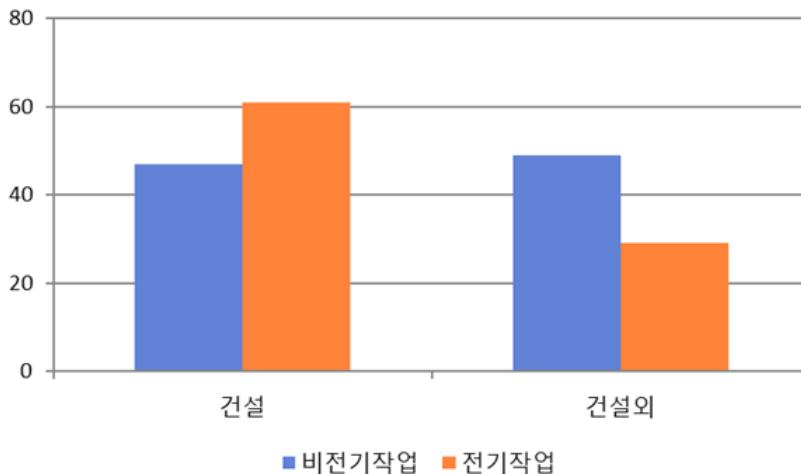
[그림 II-19] 작업자수별 감전 중대재해 발생 비교 현황

사) 작업목적

최근 10년간(2013년~2022년) 감전 중대재해를 다음 [그림 II-20]과 같이 건설과 건설외 업종을 작업목적별로 비교하였다.

여기서 작업목적에 따라 안전조치 등의 내용이 다를 수 있기 때문에 작업목적은 전기작업과 비전기작업으로 구분하였다. 예를 들어, 비전기작업의 경우에는 위험성평가 및 안전관리 측면에서 전기 관련 항목이 누락되거나 평가 또는 관리 수준이 미흡할 수 있기 때문이다.

건설업과 건설외 비교 결과, 건설에서는 작업목적이 전기작업이 많았고, 비건설에서는 비전기작업이 많았다. 이는 전기공사업이 건설업으로 분류되기 때문에 나타나는 현상으로도 볼 수 있으나, 건설외의 경우에는 전기작업 여부와 상관없이 감전 중대재해가 발생하고 있으므로 건설과 건설외 업종을 구분하여 감전사고 예방대책을 수립할 필요성이 있다.



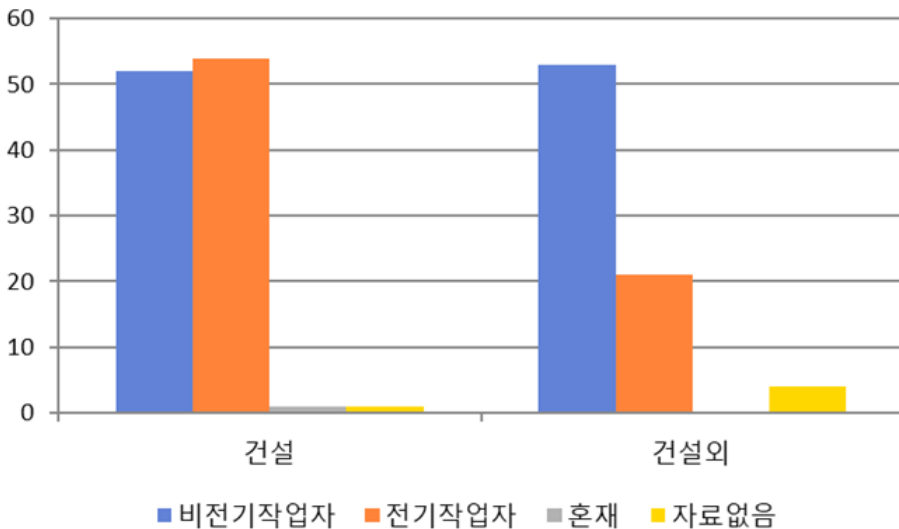
[그림 II-20] 작업목적별 감전 중대재해 발생현황

아) 작업자 직종

최근 10년간(2013년~2022년) 감전 중대재해를 다음 [그림 II-21]과 같이 건설과 건설외 업종을 작업자 직종별로 비교하였다.

여기서 작업목적에 따라 안전조치 등의 내용이 다를 수 있기 때문에 작업 목적은 전기작업과 비전기작업으로 구분하고 해당 작업목적에 적합한 작업자를 투입하여야 한다. 작업목적과 작업자 직종의 직접 비교에서는 자료 부족으로 판단하기 어렵다.

건설업과 건설외 외 비교 결과, 건설에서는 비전기 작업자와 전기작업자의 감전 중대재해 비율이 유사하였으나, 건설외에서는 비전기작업의 비율이 약 2.5배 정도 높았다. 이는 비전기작업의 경우라도 감전에 대한 위험성평가를 내실화하고 작업자 교육훈련 등을 통해 주지할 필요성이 있다.

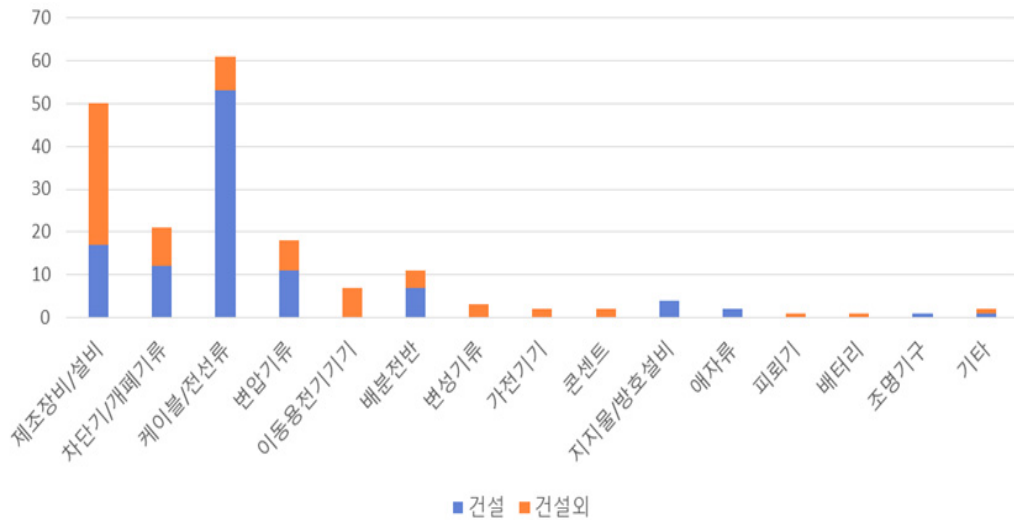


[그림 II-21] 작업자 직종별 감전 중대재해 발생현황

자) 기인물

최근 10년간(2013년~2022년) 감전 중대재해를 다음 [그림 II-22]와 같이 건설과 건설외 업종을 기인물별로 비교하였다.

건설업과 건설외 외 비교 결과, 건설에서는 전기설비의 차단기/개폐기류, 케이블/전선류 및 변압기류 순으로 발생하고 있으며, 건설외에서는 제조 및 생산설비, 이동용 전기기기 및 전기설비 순으로 발생하고 있다. 즉, 건설과 건설외의 공정별 비교에서는 상반된 경향성을 보이기 때문에, 건설과 건설외 업종을 구분하여 감전사고 예방대책을 수립할 필요성이 있다.

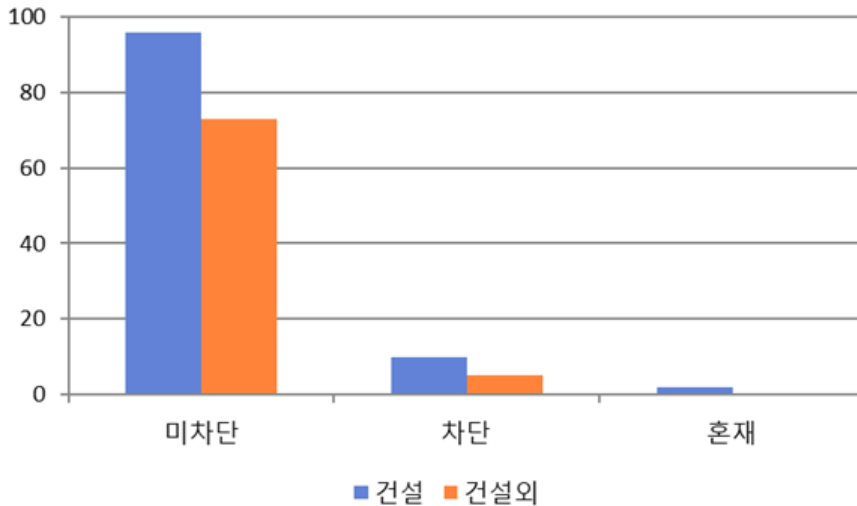


[그림 II-22] 기인물별 감전 중대재해 발생현황

차) 전원차단 여부

최근 10년간(2013년~2022년) 감전 중대재해를 다음 [그림 II-23]과 같이 건설과 건설외 업종을 전원차단 여부별로 비교하였다.

건설업과 건설외 외 비교 결과, 건설과 건설외 모두 전원 미차단 상태에서 다수 발생하고 있다. 무엇보다도 감전사고를 근본적으로 예방하기 위한 효율적 수단으로는 정전작업이 원칙이다. 이를 위해 안전작업 절차서 및 계획서 등에 명확화할 필요가 있다.

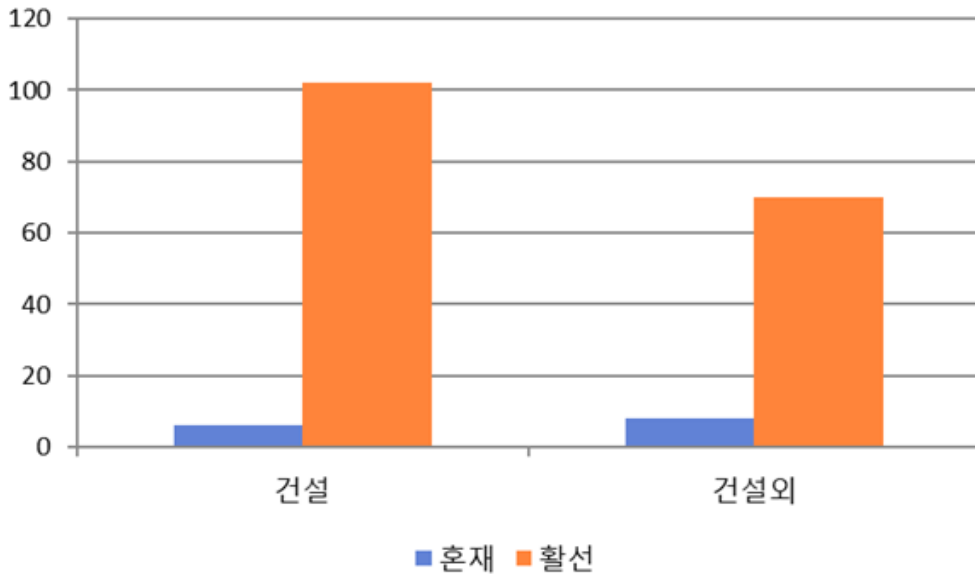


[그림 II-23] 전원차단 여부별 감전 중대재해 발생현황

카) 전원상태

최근 10년간(2013년~2022년) 감전 중대재해를 다음 [그림 II-24]와 같이 건설과 건설외 업종을 전원 상태별로 비교하였다.

건설업과 건설외 업종 비교 결과, 건설과 건설외 모두 활선 상태에서 다수 발생하고 있다. 여기서 조사의견서 분석 결과 사고발생 대상 작업은 정전작업으로 구분할 수 있으나 대상 작업의 주변 환경은 일부 활선 및 혼재 작업조건으로, 이에 대한 명확한 구분 기준이 필요하다.

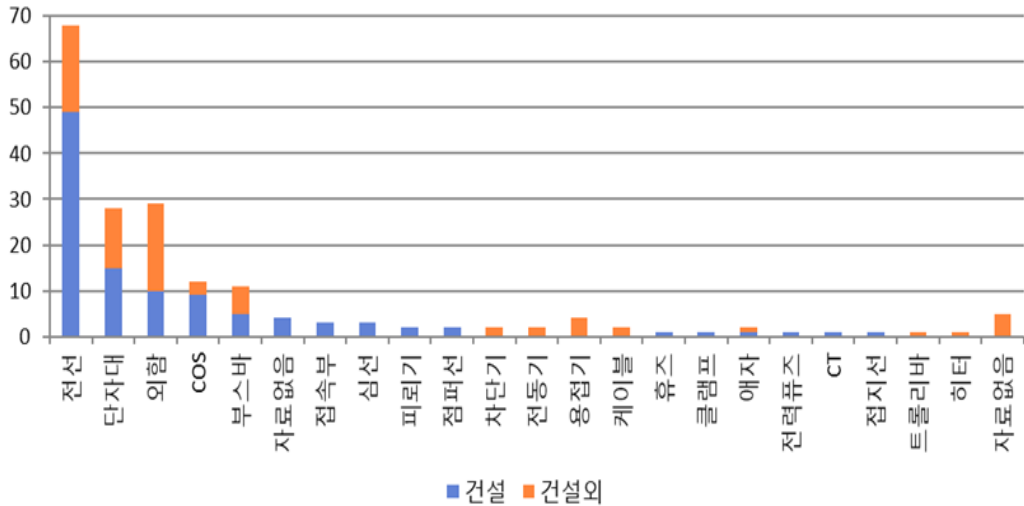


[그림 II-24] 전원상태별 감전 중대재해 발생현황

하) 충전부

최근 10년간(2013년~2022년) 감전 중대재해를 다음 [그림 II-25]와 같이 건설과 건설외 업종을 충전부별로 비교하였다.

건설업과 건설업 외 비교 결과, 건설과 건설외 모두 전기를 취급하고 있는 전기설비에서 다수 발생하고 있다. 공통적으로는 전선, 단자대, 외함 및 수변전 설비 등 순으로 발생하고 있다. 건설외의 경우 전선 및 단자대 보다는 외함 비중이 높기 때문에, 직접접촉보다는 누설전류의 감전의 비중이 높다는 것이다.

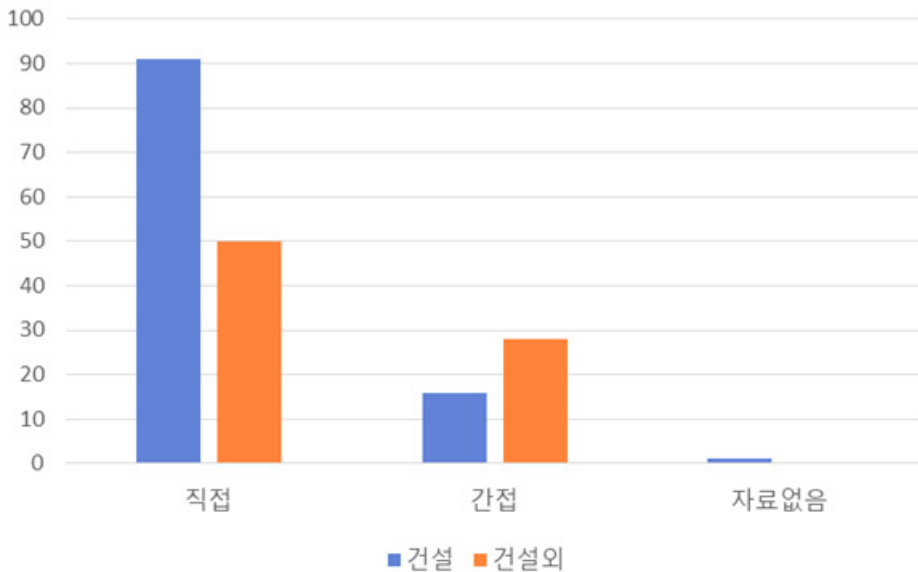


[그림 II-25] 충전부별 감전 중대재해 발생현황

거) 충전부 접촉형태

최근 10년간(2013년~2022년) 감전 중대재해를 다음 [그림 II-26]과 같이 건설과 건설외 업종을 충전부 접촉형태별로 비교하였다.

건설에서는 충전부 직접접촉 비율이, 건설외에서는 충전부 간접접촉 비율이 높았다. 전기공사업이 포함되는 건설에서는 활선작업이 다수를 차지하기 때문에 직접접촉 비율이 높았으며, 비건설에서는 제조생산 공정에서 사용취급되는 기계·설비 등의 절연열화에 의한 누설전류에 의한 감전이 다수를 차지하기 때문에 간접접촉 비율이 높았다. 여기서 직접접촉에서 건설외 발생건수가 50건으로 상대적으로 비중이 높고, 이는 전기설비의 유지보수 등 간접작업에서 다수 발생하는 것으로 분석되었다.

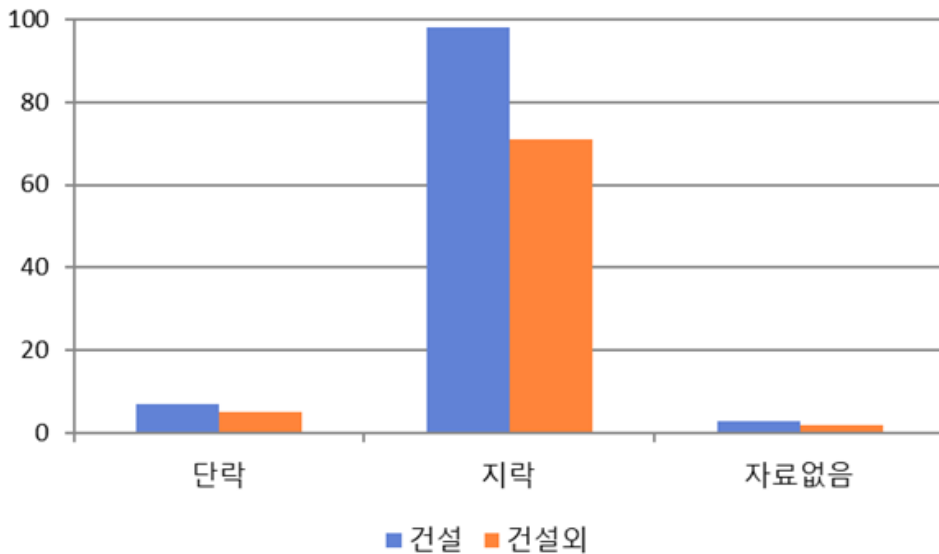


[그림 II-26] 충전부 접촉형태별 감전 중대재해 발생현황

너) 통전형태

최근 10년간(2013년~2022년) 감전 중대재해를 다음 [그림 II-27]과 같이 건설과 건설외 업종을 통전형태별로 비교하였다.

건설업과 건설외 의 비교 결과, 건설과 건설외 모두 지락 상태에서 다수 발생하고 있다. 건설과 건설외 공통적으로는 단락보다는 지락 통전형태에서 대부분 발생하고 있다.

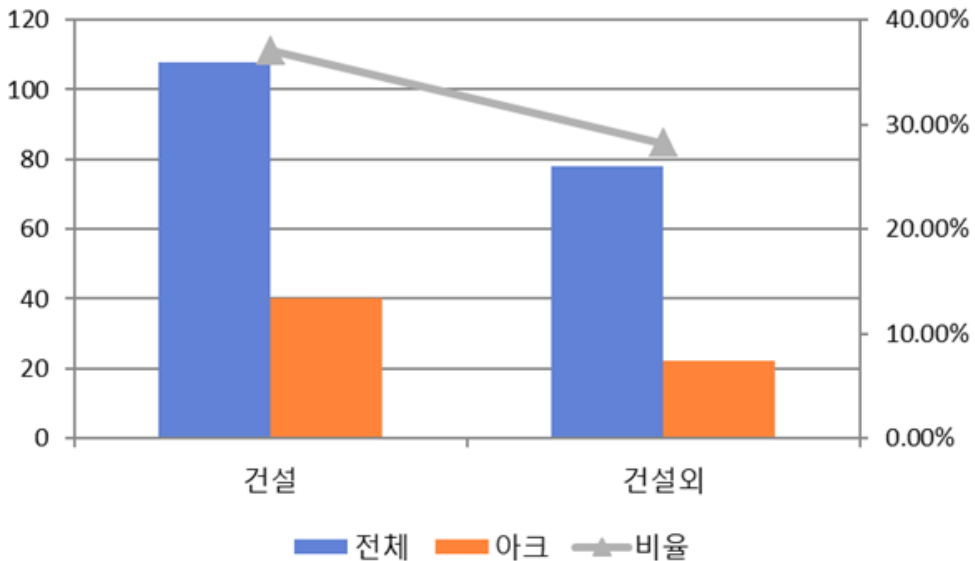


[그림 II-27] 통전형태별 감전 중대재해 발생현황

더) 아크발생

최근 10년간(2013년~2022년) 감전 중대재해를 다음 [그림 II-28]과 같이 건설과 건설외 아크 발생을 통전형태별로 비교하였다.

통전회로 개폐 시 크고 작은 전기적 아크(Arc)가 발생한다. 예를 들어, 대전류가 흐르거나 고전압이 가압된 회로에서 단락 또는 지락사고가 발생 시 강열한 아크가 발생될 수 있으며, 고온의 폭발적인 현상이 발생으로 순식간에 전선 등을 녹여 버린다. 따라서 이 아크의 복사열에 작업자는 전기화상을 입을 수 있다.

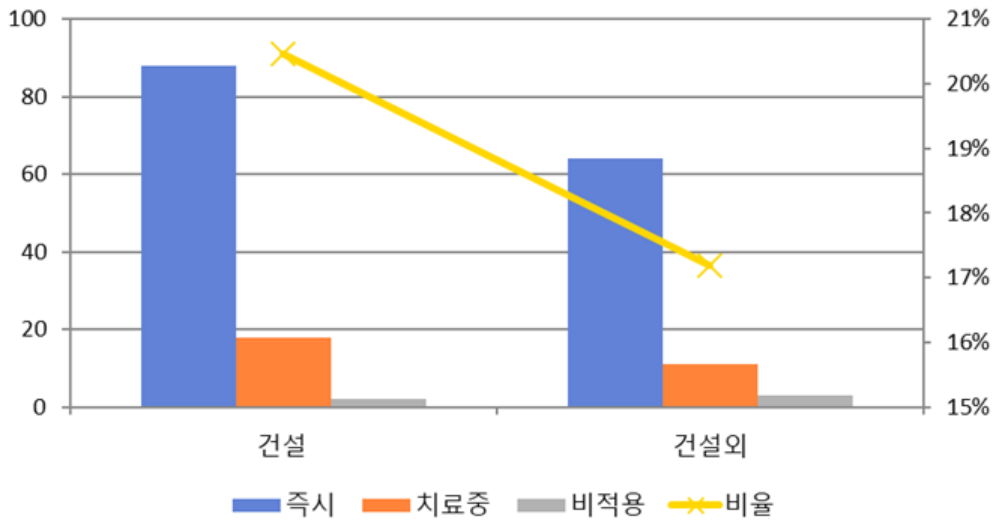


[그림 II-28] 아크발생별 감전 중대재해 발생현황

러) 사망시점

최근 10년간(2013년~2022년) 감전 중대재해를 다음 [그림 II-29]와 같이 건설과 건설외 업종을 사망시점별로 비교하였다.

건설업과 건설업 외 비교 결과, 건설과 건설외 모두 치료 중 감전 사고사망 비중이 상대적으로 높다. 따라서 감전사고 중상해 재해의 사고사망 연계 차단을 위한 추가 및 사후 안전조치에 대한 고려가 필요하다. 특히 치료 중 사망자 다수가 아크 열에 의한 화상 부상자로, 인체 감전을 포함하여 아크열에 화상에 대한 고려도 필요하다.

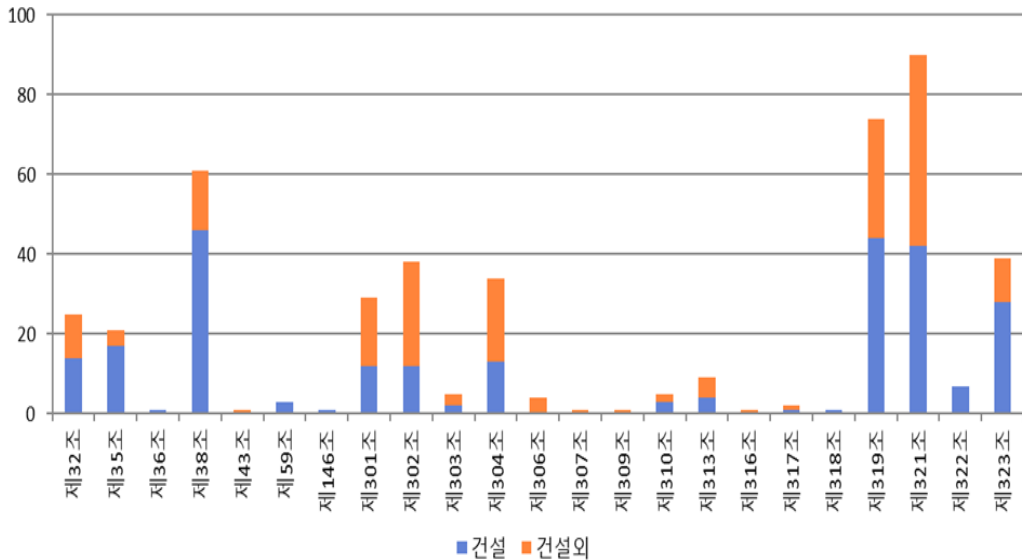


[그림 II-29] 사망시점별 중대재해 발생현황

머) 산업안전보건기준에 관한 규칙

최근 10년간(2013년~2022년) 감전 중대재해를 다음 [그림 II-30]과 같이 건설과 건설외 업종을 산업안전보건기준에 관한 규칙의 조항별로 비교하였다.

산업안전보건기준에 관한 규칙 조항 비교 결과 제38조의 경우 건설에서 위반 비율이 높았으며, 제319조 및 제321조의 경우 건설과 건설외에서 유사한 경향성을 보인다. 그리고 건설외에서는 제301조, 제302조 및 제304조의 위반 비율이 높았다.



[그림 II-30] 산업안전보건기준에 관한 규칙 조항별 감전 중대재해 발생현황

5) 감전 중대재해 Case Study

(1) 세탁기 수리작업 중 감전

가) 발생 개요

'21.09.28, 13:50경 재해자가 세탁기 수리 서비스를 요청한 서울 목동2단지 아파트 세대 내에서 세탁기 수리 작업 중 감전으로 사망

나) 조사 내용

- ❶ 재해자가 수리작업을 위해 세탁기를 약 20cm 정도 끌어내는 과정에서 세탁기 후면의 급수관이 파손되면서 바닥은 물이 흥건한 상태가 됨
- ❷ 재해자는 세탁기 급수관과 연결된 수전을 잠그기 위해 세탁기 후면 공간으로 들어가 확인 중 세탁기 충전부에 감전됨
※ 조사 시점에서의 세탁기 절연상태는 양호한 것으로 확인됨

다) 발생 원인

- ❶ 세탁기 누전 등에 대한 수리를 요청함에 따라 감전 위험이 예상되는 세탁기 수리 작업을 위한 전원 차단 미실시
- ❷ 감전사고 방지를 위한 절연용 보호구 미착용
- ❸ 세탁기 전원 접속부에 누전차단기가 아닌 배선용차단기 연결 사용

라) 시사점

가전제품(세탁기) AS 기사 작업장소는 사업주의 관리감독을 받는 장소가 아니기 때문에 사업주가 안전조치를 직접 할 수 없어서, 작업장소 특성상 고객에게 안전조치를 요구할 수 없고, 위험성을 인지하더라도 AS작업 특성상 작업자가 직접 고객 등의 거주 또는 작업장소에서 안전조치 이행하기가 쉽지는 않다. 따라서 사업주의 지배를 받지 않는 장소에서 업무를 수행하는 근로자의 경우 안전 교육, 안전작업 절차 및 매뉴얼 등을 통해 작업자의 안전을 확보해야 한다.

(2) 축전지 저항측정 작업 중 아크 화상

가) 발생 개요

'19.01.23, 11시경 (주)OO IDC센터에서 재해자가 축전지(배터리) 저항측정을 위해 BMS⁸⁾ 연결전선을 가위로 절단 중 아크발생으로 부상(화상)

나) 조사 내용

- ① 재해자는 (주)OO IDC센터에 출장 방문하여, 전기실 내 A라인 축전지 내부 저항측정 작업을 완료하고 B라인으로 이동
- ② 재해자는 축전지 내부저항 측정작업을 위해 BMS 연결전선을 가위로 절단 중 절단 가위가 축전지 구조물과 접촉되거나 절단된 활선 상태의 전선이 축전지 구조물과 접촉되면서 단락이 발생함

다) 발생 원인

- ① BMS 연결전선 절단 등 활선작업 시 축전지 또는 금속 재질의 축전지 구조물에 절연조치 미실시
- ② 축전지 취급 근로자 절연용 보호구 미착용

다) 시사점

직류전원의 경우 교류전원보다 전기화재에 취약하며, 배터리 등 이차전지 관련 안전조치 사항이 명확하지 않다. 따라서 현재 안전조치에 대한 사각지대 해소 차원에서 국내·외 기술표준과의 비교 검토를 통해 직류전원 관련 안전 작업 수칙 마련이 필요하다.

8) Battery Monitoring System: 축전지 전압 및 전류를 측정하는 장비

(3) 창고 정리작업 중 감전

가) 발생 개요

'19.07.01, 23시경 재해자가 이삿짐 운반업체의 창고에서 정리작업 중 냉장고 주변에서 감전으로 사망

나) 조사 내용

- ① 해당 업체의 창고 내 조명시설이 없어 전기공사(5.7~5.8) 실시
- ② 재해자는 창고 정리작업 중 냉장고 후면에서 미사용 자재(종이 박스) 등을 꺼내거나 걸레로 바닥 청소 실시
- ③ 재해자 발견 장소 주변 냉장고의 절연상태는 양호하나, 냉장고 후면 철판의 전압이 220V로 측정됨
- ④ 조명설치를 위한 전기공사 과정에서 충전부 노출 전선의 절연조치 미실시로 조명 분전반 내 철판과 접촉되어 지락이 발생함
- ⑤ 이때 냉장고 후면 철판에 연결된 접지선이 조명 분전반 접지선과 연결되어 냉장고 후면 철판은 충전상태가 됨

다) 발생 원인

- ① 정전작업 후 전원을 공급하기 전에는 작업기구, 단락 접지기구 등을 제거하고 전기기기 등이 안전하게 통전될 수 있는지를 확인하지 않음
※ 계측기로 전압 및 절연저항을 측정하지 않음

라) 시사점

전기공사의 적정성 여부는 산업안전보건기준에 관한 규칙에서 별도 규정하고 있지 않지만, 공사 완료 후 전기기기 등이 안전하게 통전될 수 있는지에 대한 확인은 사업주가 실시하여야 한다.

(4) 컨베이어 주변 청소작업 중 감전

가) 발생 개요

'18.08.06, 04:12경 재해자가 택배 물류운송 사업장에서 경사 컨베이어 하부에서 청소 작업 중 감전

나) 조사 내용

- ① 재해자는 담당 컨베이어 구간의 화물 하차작업을 완료하고, 다른 작업 구간의 주변 청소를 위해 하차작업 중인 5번 컨베이어 이동
 - ② 재해자는 작업 중인 5번 컨베이어의 경사 구간과 6번 컨베이어의 수평 구간 사이에서 청소 작업을 위해 접근
 - ③ 6번 컨베이어에 설치된 ITS⁹⁾ 장비의 알루미늄 프레임과 컨베이어에 동시 접촉으로 감전
 - ④ ITS 프레임에 접촉한 것으로 추정 및 관련 전기설비의 누전점 확인 불가
- ※ ITS 프레임 내 LED, 스캐너 제어반은 ITS 프레임에 설치된 콘센트로부터 220V를 공급받고 있으며, 직류전원장치(SMPS¹⁰⁾)의 국과수 분석결과 누전여부 확인 불가

다) 발생 원인

- ① ITS 제어반 및 프레임 외함 접지 미실시
- ② ITS 설비의 절연상태 불량으로 누설전류 발생

9) Intelligent Terminal System: 화물의 바코드를 스캐닝하여 배송지를 인식하는 장비

10) Switching Mode Power Supply: 스위칭 동작에 의한 전원공급장치를 의미하며, 수십~수백 kHz의 스위칭 주파수로 인해 에너지 축적용 부품 등의 소형·경량화 가능함

라) 시사점

산업현장에서는 교류전원과 함께 변환설비 사용 증가에 따라 교류, 직류 및 맥류 등의 전원이 사용 증으로 감전사고의 경우 충전부 확인에 대한 심층 분석이 필요하다.

(5) 송전선로 접지선 분리작업 중 감전

가) 발생 개요

'18.04.20, 13:15경 가공송전선로 순시점검 위탁공사 현장에서 재해자가 철탑 점검 작업을 완료하고 단락접지기구 해체하기 위해 접지선 분리 중 감전

나) 조사 내용

- ① 재해자는 철탑 점검(정전작업)을 완료하고 단락접지기구의 접지선을 회수하기 위해 철탑으로 올라감
- ② 재해자는 중단 암(Arm)으로 이동하여 상단 암(Arm)과 중단 암(Arm)에 설치된 접지선의 고정부를 절연봉을 사용하여 해체함
- ③ 그리고 하단 암으로 이동하여 중단 암에 있던 동료 작업자로부터 넘겨 받은 절연봉으로 하단 암에 설치된 접지선의 고정부를 해체하려고 했으나, 풀리지 않았음.
- ④ 이에, 애자련에 안전대를 걸고 전선을 밟은 상태에서 접지선을 손으로 해체 중 접지선이 전선에서 분리되는 순간 인체 통전경로가 형성됨
- ⑤ 그리고 15m 이격된 활선상태의 송전선로(345kV)로부터 유도전압¹¹⁾(평균 353V)이 정전선로에 유기되어 재해자가 감전됨

11) 활선상태의 송전선로에는 교류 420A의 전류가 흐르고 있었으며, 송전선로 길이가 32km로 길기 때문에 활선상태의 송전선로로부터 15m 이격된 정전선로에는 353V 보다 높은 유도 전압이 유기되었을 것임

다) 발생 원인

- ❶ 정전작업 관련 안전작업 계획서에 단락접지기구 해체 작업절차 미포함
- ❷ 활선작업용 기구(절연봉)의 접지선 체결금구 훼손
- ❸ 절연화의 절연성능 저하 및 절연장갑 미착용

라) 시사점

단락접지 기구의 설치·해체를 위한 안전작업 절차 미수립과 활선 작업용 기구의 성능 저하가 직접원인으로 작용하였지만, 안전작업 시스템이 아무리 완벽하더라도 작업자 작업 장소 주변에 전기에너지가 존재하는 한 감전 위험성은 상시 존재한다. 따라서 근본적으로 유사한 형태의 중대재해를 예방하기 위해서는 유도전압이 발생하지 않도록 작업자 상부에 설치된 345kV 송전선로에 대한 정전에 대한 고려도 필요하다.

(6) 태양광 인버터 유지보수 작업 중 감전

가) 발생 개요

'14.08.05, 14:20경 경남 창원군 소재 태양광 발전 장소에서 피해자가 태양광 인버터 패널 내부의 콘덴서(Condenser) 교체 작업 중 직류전원(663V) 단자에 접촉되어 감전됨

나) 조사 내용

- ❶ 콘덴서 해체/철거 및 신품 장착 작업은 2인 1조로 수행되며, 재해자는 장착된 콘덴서 고정 작업을, 동료 작업자는 콘덴서와 부스바 연결 작업을 각각 수행함
- ❷ 태양광 발전 원리에 따라 주간에는 태양광 발전을 임의로 중단시킬 수 없고 태양광 패널과 직류입력 단자대 사이에 전원 차단기능이 없음

- ③ 또한 태양광 인버터 판넬에서 직류입력 단자대가 직류입력 차단기 전단에 위치하고 있어 직류입력을 차단하더라도 단자대는 충전상태임(663V)
- ④ 재해자는 콘덴서의 상부 조립작업 중 좌측 무릎이 충전부 단자대 P(+)에 접촉된 상태에서 다른 신체 일부가 인버터 외함 또는 구조물에 접촉되면서 통전경로가 형성되어 감전됨

다) 발생 원인

- ① 태양광 인버터 유지보수 작업 시 정전작업 미실시
- ② 전기작업의 경우 감전방지를 위한 절연용 보호구 미착용

라) 시사점

태양광은 일조 상태에서는 발전이 지속되기 때문에 인위적으로 발전을 중단할 수가 없어서, 태양광 패널과 인버터 사이에는 충전상태가 유지될 수밖에 없다. 이러한 내용이 KEC 규정에는 반영되어 있지만, 산업안전보건법에서는 명확한 규정이 없고 기술적으로 차단이 불가능한 상황이다.

(7) 폐가스 처리설비 유지보수작업 중 감전

가) 발생 개요

'14.07.22, 14시경 폐가스 처리설비의 덕트 내부에서 전동 해머드릴을 사용하여 스케일 제거 작업 중 감전

나) 조사 내용

- ① 재해자는 덕트 내부 굴곡지점에서 전동 해머드릴을 사용하여 스케일 파쇄 작업을 실시함

- ② 동료 작업자가 재해자 구출을 전동 해머드릴을 분리하기 위해 재해자 손을 잡는 순간 전격을 느끼고, 외부에서 전원을 차단함
- ③ 전동 해머드릴이 연결되는 전원 접속부에는 누전차단기가 설치되어 있었으나 미작동하였으며, 누전차단기 동작 시험 결과 20mA로 확인되어 전동 해머드릴의 누설전류는 20mA 미만으로 추정함
- ④ 인체 통전전류가 20mA 미만이지만, 인체 저항값(500Ω)과 통전시간(60sec)을 고려하여 감전사로 판단함

※ 재해발생 당일 날씨는 덥고 습도가 높았으며, 덕트 내부 온도는 40~50℃임

다) 발생 원인

- ① 물 또는 도전성이 높은 장소에서 사용하는 이동형 전동기계기구 접지 미실시

라) 시사점

인체 감전 시 가장 중요한 요인은 인체 통전전류이고 이때 통전전류는 인체저항에 따라서 결정된다. 그러나 인체 저항값에 대한 명확한 기준이 없고, 신체조건, 작업 상황 및 조건, 기상 상황 등에 따라 인체 저항값은 매우 다양하다. 20mA 이하 통전전류로 인한 감전은 인체저항 및 통전시간과의 상관관계에 대한 추가적인 검토가 필요하다.

(8) 송전선로 점검작업 중 감전

가) 발생 개요

'14.10.10, 10:20경 154kV OO-OO T/L 인수점검 현장에서 재해자가 선로 설치상태를 점검하기 위해 정전선로(154kV)에 발을 딛는 순간 유도전압에 의한 감전

나) 조사 내용

- ① 기존 설치 송전선로(345kV) 하부에 신규로 설치한 154kV 선로를 설치한 후 공사품질에 대한 적합성 여부를 판단하기 위한 점검 실시
※ 154kV 선로에 대한 점검은 정전작업 실시
- ② 재해자는 작업위치 송전탑 압 단부에 도착하여 안전대를 착용하고 애자를 타고 신규 설치 선로로 내려가면서
- ③ 재해자가 완금류를 잡는 순간 상부의 345kV 활선 선로에서 154kV 정전 선로로 유도된 전압에 의해 감전

다) 발생 원인

- ① 노출 충전부 또는 그 부근에서 작업 시 해당 전로 미차단

라) 시사점

안전작업 시스템이 아무리 완벽하더라도 작업자 작업장소 주변에 전기에너지가 존재하는 한 감전 위험성은 상시 존재한다. 따라서 근본적으로 이러한 중대재해를 예방하기 위해서는 유도전압이 발생하지 않도록 작업자 상부에 설치된 345kV 송전선로에 대한 정전도 필요하다. 무엇보다도 정전과 활선의 혼재 작업 및 구간에 대한 명확한 규정이 필요하다.

4. 소결

1) 중대재해 조사의견서 분석

고용노동부 산업재해통계에서 최근 10년간(2013년~2022년) 발생한 감전 중대재해를 대상으로 조사의견서를 추출하여 개별 건마다 확인·분석하였다. 조사의견서 분석 결과는 다음 장의 미래 전기에너지 변화 내용과 연계 분석·

정리하여 전기에너지 관련 법·제도 및 기술의 개선 방안 수립에 활용 예정이다. 여기서 최근 10년간(2013년~2022년) 발생한 감전 중대재해 조사의견서 분석을 위해 감전 발생 매커니즘을 토대로 단계별 영향요인 변수 등을 고려하였으며, 추가적으로 작업자, 충전부, 공정·작업 및 설비 그리고 안전조치 사항 등의 다양한 변수를 고려하여 모형을 설계하였다.

최근 10년간(2013년~2022년)의 감전사고 사망자수는 등락을 반복하면서 감소 추세를 보이고 있으나, 2020년부터는 감전사고 사망자수 감소 추세가 정체되고 있다. 그러나 중상해 재해의 사고사망 연계 관점에서 감전사고 부상자수는 뚜렷한 감소 추세를 보이지 않고 있고, 무너짐, 화재 및 폭발·파열과 함께 재해자수 대비 사망자수 비율이 높다는 점을 고려하지 않을 수 없다.

특이한 점은 감전사고 발생 매커니즘도 명확하고, 감전사고 발생 경향성도 유사 내지 단순함에도 불구하고 유사한 감전사고가 지속·반복적으로 발생하고 있다는 것이다. 이는 “공정·작업 및 기계·설비에 전기에너지가 존재하는 한 감전사고는 필연적으로 발생할 수 밖에 없다” 라는 점을 반증하고 있다고 볼 수 있다.

또한, Case Study를 통해 도출한 감전 중대재해 관련 시사점은 다음과 같다. 먼저 미래환경 및 산업구조 변화로 인해 전기설비의 특성과 작업자의 고용형태 등도 변화됨에 따라, 법·제도의 사각지대 발생을 예측할 수 있었다. 그리고 산업안전보건기준에 관한 규칙에 따라 정전작업이 원칙이나 사회적·경제적 여건으로 인해 정전작업이 현실적으로 불가능하기 때문에 활선작업에서 감전 사고가 발생할 수밖에 없다. 따라서, 획기적인 감전사고 사망자수를 줄이기 위해서는 정전작업에 대한 사회적 합의를 고려해 볼 필요가 있다.

2) 건설과 건설외의 감전 중대재해 발생현황 비교

건설과 건설외의 감전 중대재해 발생 현황 비교에서는 전기공사업이 속하는 건설에서 감전 중대재해가 108건, 건설 외에서 78건이 발생하였다.

주요 내용으로는 ① 발생 형태별 상대 비교에서는 건설에서는 충전부 직접 접촉이 건설외에서는 누설전류에 의한 감전 즉 간접접촉이 비율이 높았다. ② 발생장소별 상대 비교에서는 건설에서는 전기설비가, 건설외에서는 제조생산과 관련 장소에서의 비율이 높았다. ③ 발생공정별 상대 비교에서는 건설에서는 전기설비 관련 작업이, 건설외에서는 전기설비 점검 및 생산 작업 비율이 높았다. ④ 작업 위치별 상대 비교에서는 건설과 건설외 모두 수변전설비에서, 건설외에서는 생산설비 비율이 높았다. ⑤ 작업자수 상대 비교에서는 건설과 건설외 모두 1인 작업 비율이 높았다. ⑥ 작업목적별 상대 비교에서는 건설에서는 전기작업 비율이 높았으나, 건설외에서는 비전기작업 비율이 높았다. ⑦ 작업자 직종별 상대 비교에서는 건설에서는 비전기작업자와 전기작업자 비율이 유사하였으나, 건설외에서는 비전기작업자 비율이 전기작업자보다 2배이상 높았다. ⑧ 기인물별 상대 비교에서는 건설외에서는 제조장비/설비에서, 건설에서는 케이블/전선류에서 가장 비율이 높았다. ⑨ 전원차단 여부별 상대 비교에서는 건설과 건설외 모두 전원 미차단 상태로 작업중 감전사고가 발생하였다. 따라서, 감전 중대재해는 활선상태에서 거의 발생한다고 볼 수 있다. ⑩ 기인물의 충전부 상대 비교에서는 건설에서는 전선 및 단자대 비율이, 건설외에서는 제조·생산 설비의 외함 비율이 높았다. ⑪ 충전부 접촉형태 상대 비교에서는 건설에서는 직접접촉, 건설외에서는 간접접촉 비율이 높았다. ⑫ 통전형태 상대 비교에서는 건설과 건설외 모두 지락 비율이 높았다. ⑬ 아크발생 여부별 상대 비교에서는 고압이상을 취급하는 전기공사업이 포함된 건설에서는 비율이 건설외 보다 높았다. ⑭ 사망시점 상대 비교에서는 치료 중 사망비율이 건설이 건설외보다는 높았다. ⑮ 산업안전보건기준에 관한 규칙 조항별 상대비교에서는 건설에서는 제38조(사전조사 및 작업계획서의 작성 등) 비율이 높았으며, 건설외에서는 제301조(전기 기계기구 등의 충전부 방호), 제302조(전기 기계·기구의 접지), 제304조(누전차단기에 의한 감전 방지)의 비율이 각각 높았다.

Ⅲ. 미래 전기에너지 변화



Ⅲ. 미래 전기에너지 변화

1. 동향 분석

1) IEA의 세계 에너지 전망¹⁾

(1) 주요 이슈 및 시나리오

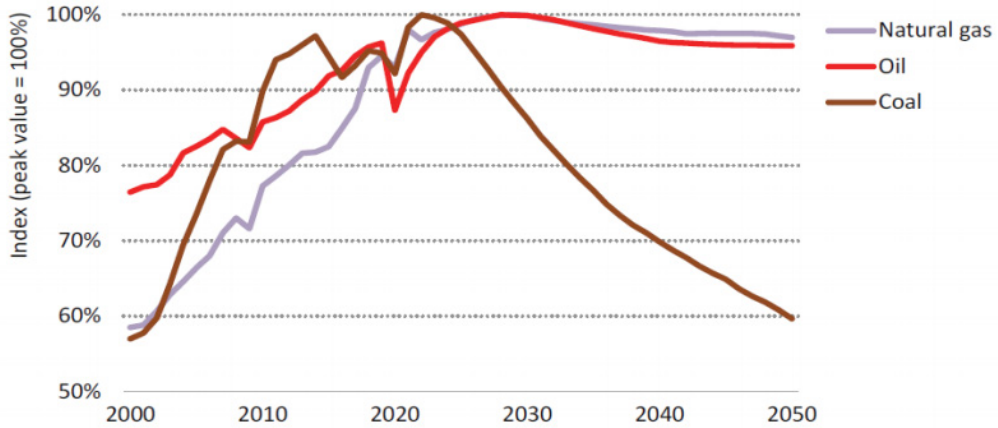
가) 2023년 주요 이슈

2022년 에너지 위기 이후 글로벌 경제적·지정학적 불확실성에도 불구하고 청정에너지로의 전환은 예상보다는 빠르게 진행되고 있다. 따라서 세계 화석 연료 수요는 2030년 이전에 정점에 이르고 이후 감소세가 예상된다.

IEA의 세계 에너지 전망(World Energy Outlook)의 정책 유지 시나리오(STEP)에서도 2030년 이전에 글로벌 석탄, 석유 및 가스 수요가 정점에 이를 것으로 전망하고 있다. 다음 [그림 III-1]에서는 글로벌 에너지 공급에서 석탄, 석유 및 가스가 차지하는 비중이 하향 곡선을 그리고 있으며 과거 수십 년간 약 80%에서 유지되던 비중이 2030년까지 73%로 감소함을 나타내고 있다.

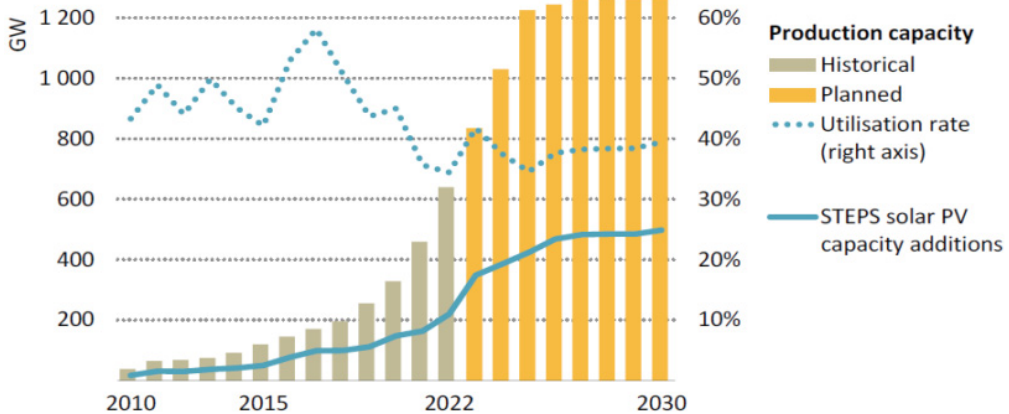
또한 [그림 III-2]와 같이 태양광 산업 관련 제조·생산 설비가 급속하게 증설되면서 2030년에는 연간 1,200GW 이상을 생산하는 규모가 될 것으로 예상되지만, STEPS에서는 2030년 필요 공급량이 500GW에 그칠 것으로 전망되고 있다. 향후 NZE 시나리오에서는 태양광 제조생산 설비의 70% 정도를 활용한다면 필요한 수준으로 보급이 확대될 것으로 전망하고 있으나 이를 위해서는 전력망 확대·강화 및 에너지 저장설비 추가 등 다양한 후속 조치의 필요성을 언급하고 있다.

1) 에너지경제연구원 세계 에너지시장 인사이트(제23-21호, 2023.11.6.)의 IEA의 세계 에너지 전망(World Energy Outlook 2023) 포커스 내용을 재구성하여 작성되었음



※ 자료: IEA(2023), World Energy Outlook 2023

[그림 III-1] STEPS의 화석연료 수요 전망



※ 자료: IEA(2023), World Energy Outlook 2023

[그림 III-2] 태양광 산업 제조생산 설비 증설 전망

나) 전망 시나리오

IEA에서 매년 발표하는 세계 장기 에너지 전망 보고서 World Energy Outlook 2023에서는 에너지 전환 정책의 진척 정도에 따라서 다음 <표 Ⅲ-1>과 같이 3가지 시나리오로 구분하여 제시하고 있다.

<표 Ⅲ-1> 세계 장기 에너지 전망 시나리오

구분	내용
정책유지 시나리오 (STEPS)	각 부문·국가·지역에서 추진하고 있는 정책과 조치와 더불어 현재까지의 감축목표, 확정 계획 등을 기반으로 전망함
목표선언 시나리오 (APS)	개별 국가 및 지역의 탄소중립 선언 및 중장기 감축목표(NDC) 등을 약속한 바대로 정확히 이행되는 경우를 상정하여 전망함
탄소중립 시나리오 (NZE)	2050년까지 전 세계가 탄소 순배출 제로 경로를 달성하고, 기온 상승 폭을 1.5℃에서 유지할 수 있다는 전제로 전망함

* 에너지경제연구원 세계 에너지시장 인사이트(제23-21호, 2023.11.6.)의 IEA의 세계 에너지 전망(World Energy Outlook 2023) 포커스 내용을 재구성하여 작성되었음

2) 에너지 수요 전망

(1) 총 최종에너지 소비부문 전망

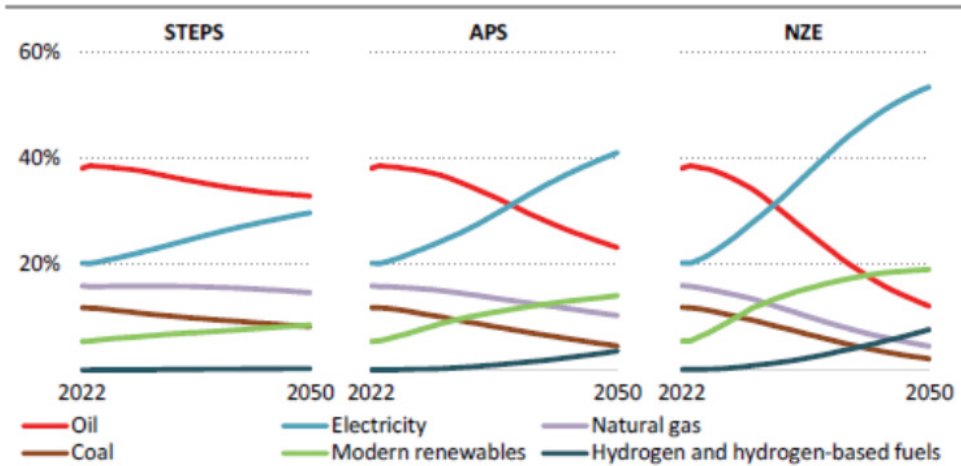
에너지 시나리오에 따라 2050 글로벌 최종에너지 소비 전망은 다소 차이를 보이지만, 다음 <표 Ⅲ-2> 및 [그림 Ⅲ-3]과 같이 에너지 효율 개선 정도에 따라 총에너지 수요 전망의 방향도 다르다. 그리고 최종에너지 소비에서 전력이 차지하는 비율은 약 20% 기준에서 2030년까지는 STEPS에서는 2%p, APS에서는 4%p, NZE에서는 8%p 증가할 것으로 전망되고 있다.

또한 총 최종에너지 소비 부문에서의 재생에너지의 직접적인 사용은 STEP 시나리오에서는 매년 3%, APS에서는 7%, NEZ에서는 9%씩 매년 확대될 것으로 전망되고 있다.

〈표 III-2〉 시나리오별 총 최종에너지 소비부문 전망

구분	내용
정책 유지 시나리오 (STEPS)	2050년까지 최종에너지 소비가 증가하나 증가세는 둔화
목표선언 시나리오 (APS)	가. APS의 경우 2020년대 후반부터는 점차 감소, NZE의 경우 2050년까지 매년 연평균 0.9% 감소
탄소중립 시나리오 (NZE)	나. 총 최종에너지 소비 전망의 차별 요인은 에너지 효율의 개선 정도로, APS에서는 STEPS 대비 건물분야에서의 리모델링이 더욱 추가되며, 운송분야에서는 연비 표준을 적용하고, 산업 공정의 효율성도 업그레이드 예정 다. 따라서, NZE에서는 에너지 효율이 2배로 개선 라. 또한, 히트펌프와 전기자동차로 대표되는 전력화 기술이 확대되면서 2030년까지 STEPS대비 APS에서 약 10%의 에너지 소비가 감축

* 에너지경제연구원 세계 에너지시장 인사이트(제23-21호, 2023.11.6.)의 IEA의 세계 에너지 전망(World Energy Outlook 2023) 포커스 내용을 재구성하여 작성되었음



※ 자료: IEA(2023), World Energy Outlook 2023

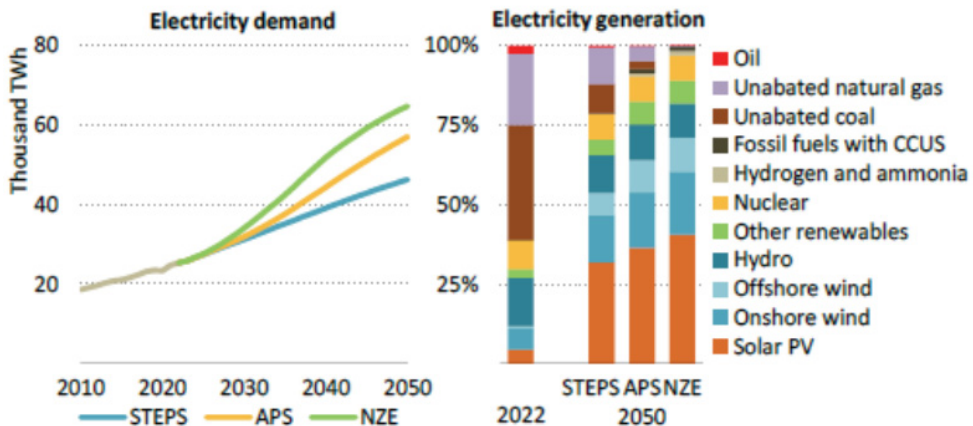
[그림 III-3] 시나리오별 글로벌 에너지 소비 전망

(2) 발전부문

가) 전력수요

모든 에너지 수요 전망 시나리오에서 글로벌 전기에너지 수요가 인구 및 소득, 그리고 최종 소비량 증가로 인해 2050년까지 빠르게 증가할 것으로 전망되고 있다.

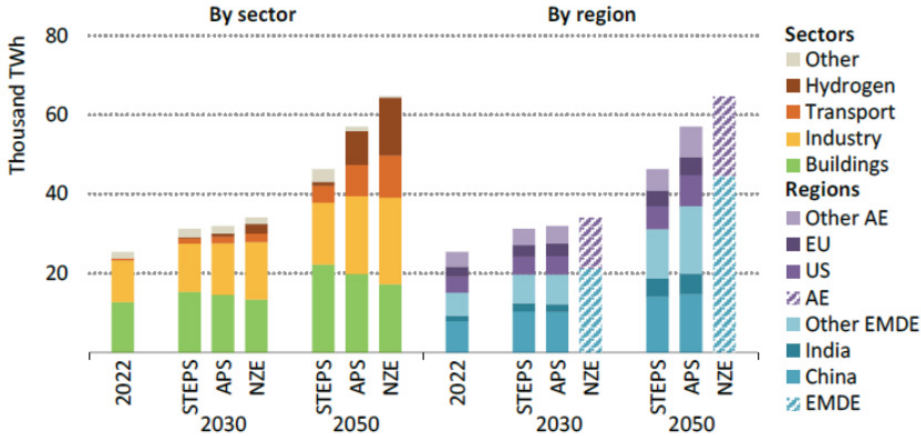
2050년까지의 전력수요가 다음 [그림 Ⅲ-4]와 같이 현재 수준과 비교해서 STEPS에서는 80% 이상, APS에서는 120% 이상, NZE에서는 150% 이상 증가할 것으로 전망되고 있다. 또한 전체 발전량에서 화석연료의 비중은 급격히 감소하고, 추가 수요는 재생에너지, 원자력, 탄소포집 적용 화력, 수소 및 암모니아 기반 발전으로 충당할 것으로 전망되고 있다.



※ 자료: IEA(2023), World Energy Outlook 2023

[그림 Ⅲ-4] 2050년 전력수요 및 시나리오별 전력믹스 전망

세 가지 시나리오에서 모든 사용 부문의 전력 소비량이 증가하는 반면, 다음 [그림 Ⅲ-5]와 같이 부문별 비중은 STEPS와 APS에서는 건물 부문의 소비가 큰 비중을 차지하고 NZE에서는 건물 부문의 에너지 효율 개선이 급속히 이루어지면서 산업부문에서 큰 비중을 차지하고 있다. 또한 신흥국 및 개발도상국이 2050년까지 글로벌 전력수요 증가분의 75%를 차지할 전망이다.



※ 자료: IEA(2023), World Energy Outlook 2023

[그림 III-5] 시나리오별 글로벌 에너지소비 전망

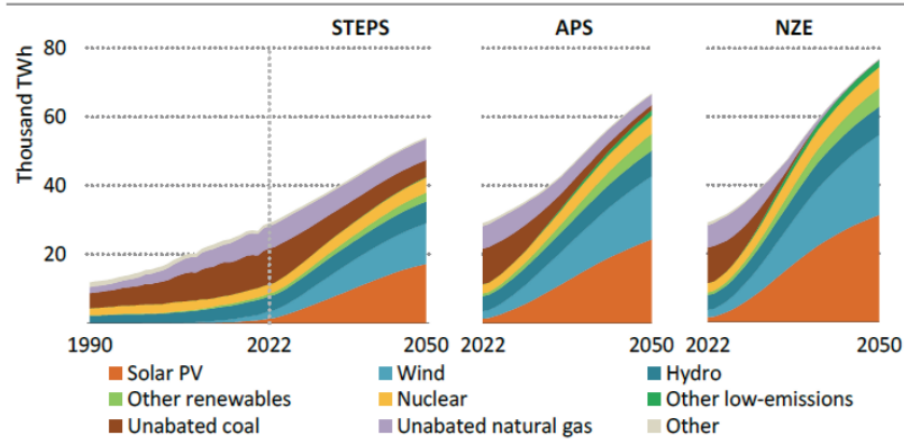
나) 전력공급

2022년 에너지 위기 이후 다수의 국가들이 발전 연료 전환을 가속화 함에 따라서 다음 <표 III-3> 및 [그림 III-6]과 같이 재생에너지와 원자력 발전 비중 전망이 상향 조정되고 있다.

<표 III-3> 에너지별 글로벌 발전량 구성 전망

에너지원	내용
재생에너지	2022년 전세계 발전량의 30%를 차지했으며, STEPS에서는 2030년까지 재생에너지 발전량이 50%까지 확대 전망
원자력	원자력 우호 국가에서의 대형 원전 수명연장, 신규 건설 및 소형 모듈 원자로 개발로 2022년 기준 417GW 규모로, 2050년까지 STEPS에서는 620GW, APS에서는 770GW, NZE에서는 900GW를 초과한 수준까지 확대 전망
석탄	현재 발전량의 36%로 가장 큰 비중을 차지하고 있지만, 2050년에는 재생에너지가 역전할 것으로 전망
천연가스	전체 발전량의 22%로 전력시스템의 신뢰도 및 회복력에서 큰 역할을 하고 있지만, 2030년 이전에는 정점을 찍고 감소 전망
이산화탄소 포집(CCU) 수소·암모니아	STEPS에서는 제한된 증가로 전망하나, APS와 NZE에서는 보다 빠른 기술 보급이 진행될 것으로 전망

* 에너지경제연구원 세계 에너지시장 인사이트(제23-21호, 2023.11.6.)의 IEA의 세계 에너지 전망(World Energy Outlook 2023) 포커스 내용을 재구성하여 작성되었음

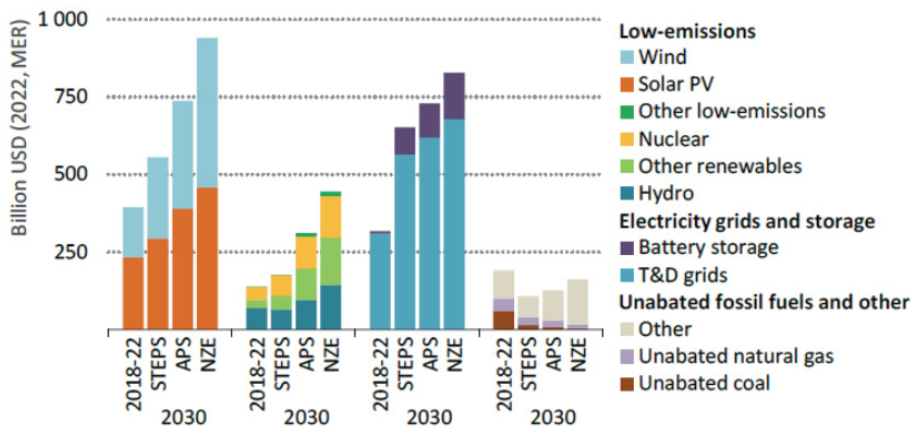


※ 자료: IEA(2023), World Energy Outlook 2023

[그림 III-6] 시나리오별 글로벌 발전량 구성 전망

다) 전력부문 투자

전력수요 증가와 더불어 청정에너지로의 전환을 지원하면서 전력 공급망을 확보하기 위해, 다음 [그림 III-7]과 같이 모든 시나리오에서 전력 부문의 투자가 증가하고 있다. 현재까지는 태양광과 풍력 투자 규모가 가장 크지만, 2030년 까지 그리드 부문의 증가폭이 가장 크게 나타날 것으로 예상된다.



※ 자료: IEA(2023), World Energy Outlook 2023

[그림 III-7] 시나리오별 글로벌 전력 공급망 투자 전망

(3) 에너지원별 수급 전망

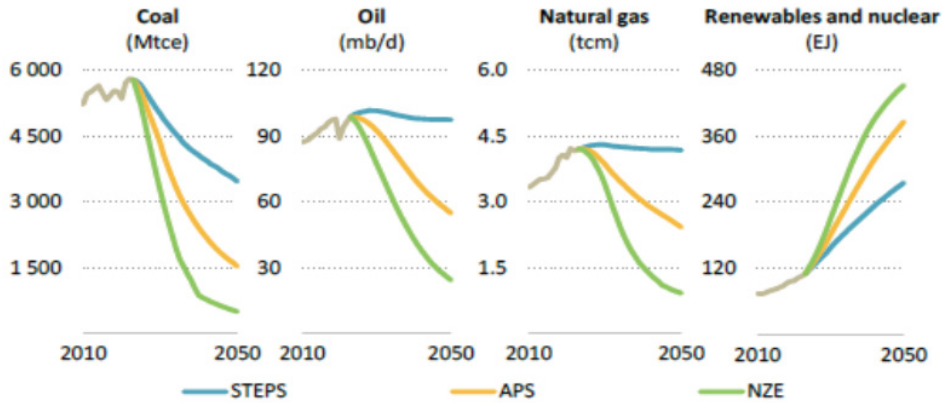
석유, 천연가스, 석탄 및 청정에너지 기술 관련 수급 전망을 다음 <표 III-4>와 같이 정리하였다.

<표 III-4> 에너지원별 수급 전망

에너지원	내용
석유	가. WEO(World Energy Outlook) 2022 대비 수요 정점 도달 시기가 약 5년 단축되었으며, 2050년까지 공급 감소 폭도 더욱 커질 것으로 전망 나. 전기자동차의 공급 확대로 도로 및 수송 부문의 수요 증가분이 석유화학 및 항공 분야에서의 수요 증가분을 상쇄시키면서 전체 수요는 감소
천연가스	가. 전력생산 및 건물 부문에서 천연가스 수요가 더 이상 확대되지 않을 것으로 예상 나. 2022년 에너지 공급 위기대응 일환으로 액화천연가스(LNG) 수출 프로젝트 투자가 단기적으로 증가하였으나, 2030년 이후 증가세 둔화 또는 감소세 전망
석탄	글로벌 석탄 소비 80% 이상 차지하는 화력발전과 철강생산 분야에서 신규 투자가 감소하고 있기 때문에, 석탄 수요는 감소 예상
청정에너지	재생에너지 보급은 2030년까지 대폭 증가가 예상되는데, STEPS와 APS에서는 전체 재생에너지 설치 용량은 2030년까지 현재 수준 대비 두 배 이상, NZE에서는 세 배 이상으로 증가 전망 - (태양광) 2022년 글로벌 신규 태양광 설비용량은 220GW로 사상 최고치 기록 및 STEPS에서는 2030년 500GW, 2050년 580GW로 증가 전망 - (풍력) 2022년 신규 풍력 설비용량은 75GW로 2020년 수준의 1/3에 그쳤지만, STEPS에서는 2030년 175GW, 2050년 195GW까지 신규 설비가 확대될 것으로 전망 - (전기자동차) 전기자동차의 판매 예상치는 WEO2022와 비교하여 상향 조정되어 STEPS에서는 2030년 전체 자동차 판매량의 40%를 차지할 것으로 전망 - (히트펌프) 2022년 글로벌 가정용 난방기구 매출의 약 10% 차지, 건물부문의 글로벌 판매량은 약 11% 증가하여, 프랑스와 미국 등 주요 시장에서는 화석연료 기반 난방시스템의 판매량을 앞서고 있음 - (청정수소) 2022년 프로젝트 투자 규모가 10억 달러로 적극적으로 추진중이나, 비용 인플레이션과 정책 불확실성, 공급망 병목현상 등으로 단기 전망은 불투명 - (CCU) 2020년대 투자 규모 확대로 지속적인 성장세 예상, 인프라 투자 촉진을 위한 정책적 지원 부재로 APS 및 NZE 시나리오 달성 전망은 불투명

* 에너지경제연구원 세계 에너지시장 인사이트(제23-21호, 2023.11.6.)의 IEA의 세계 에너지 전망(World Energy Outlook 2023) 포커스 내용을 재구성하여 작성되었음

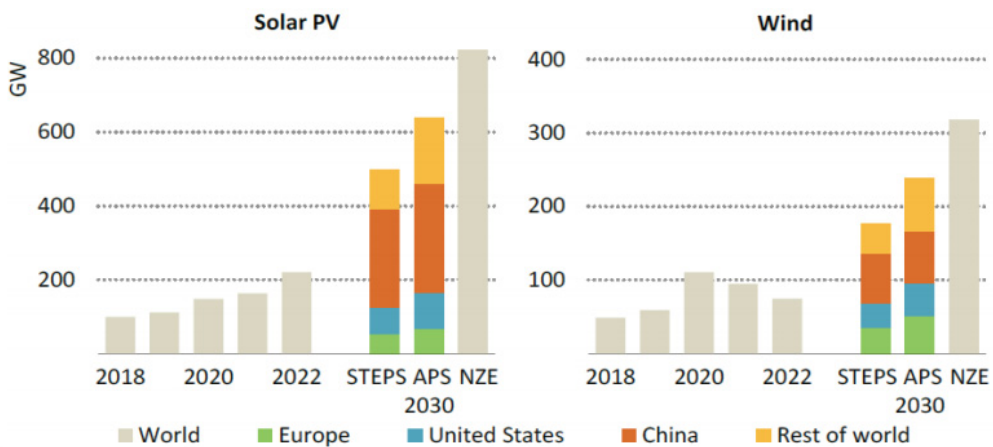
다음 [그림 III-8]에서는 세 가지 시나리오별 석탄, 석유, 천연가스 및 재생에너지·원자력 수요 전망을 나타내고 있다.



※ 자료: IEA(2023), World Energy Outlook 2023

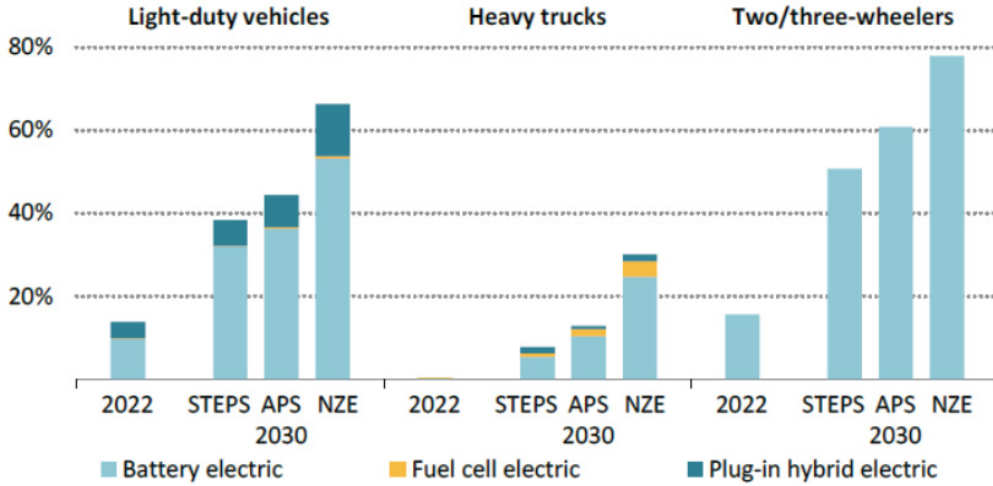
[그림 III-8] 시나리오별 화석연료, 원자력 및 신재생에너지 수요 전망

다음 [그림 III-9] 및 [그림 III-10]에서는 세 가지 시나리오별 태양광 및 풍력 추가 설비용량 전망과 전기차 유형별(승용차, 화물차 및 이륜차) 시장 점유율 전망을 각각 나타내고 있다.



※ 자료: IEA(2023), World Energy Outlook 2023

[그림 III-9] 태양광 및 풍력 추가 설비용량 전망



※ 자료: IEA(2023), World Energy Outlook 2023

[그림 III-10] 전기자동차 유형별 시장 점유율 전망

3) IEA의 2050 넷제로 로드맵(2023년)²⁾

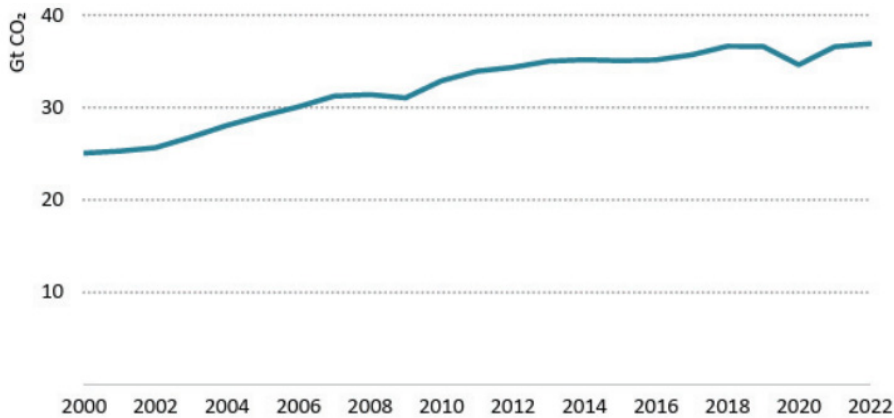
(1) 글로벌 에너지 시장의 급격한 변화

가) 글로벌 에너지 패러다임 전환 1.5°C 목표 달성 필요성

'23년 8월은 역대 가장 더웠던 시기로 이전 기록과는 상당한 격차를 보이고 있으며, 기후변화의 영향은 점점 더 심각해지고 있어 현재 탄소중립 경로의 위험성에 대한 경고는 어느 때보다 엄중한 상황이다.

'23년 2022년 글로벌 에너지 부문에서 이산화탄소 배출량이 다음 [그림 III-11]과 같이 370억 톤에 달해 역대 최고치를 경신하였으나, IEA는 주요 청정에너지 기술 보급 속도 증가세를 토대로 새로운 기후정책이 발표되지 않더라도 석유·가스 및 석탄 수요가 2030년 이전에는 정점에 달할 것으로 예상되고 있다.

2) 에너지경제연구원 세계 에너지시장 인사이트(제23-19호, 2023.10.10.)의 IEA의 2050 넷제로 로드맵(2023년 개정) 1.5°C 목표 달성을 위한 경로 포커스 내용을 재구성하여 작성되었음

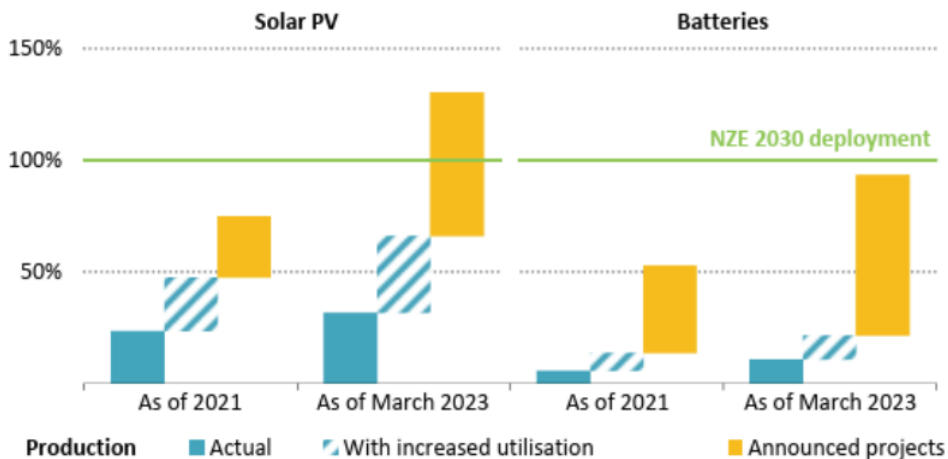


※ 자료: IEA(2023.9.26.), Net Zero Roadmap: A Global Pathway to Keep the 1.5°C Global in Research-2023 Update

[그림 Ⅲ-11] 글로벌 에너지부문 이산화탄소 배출량 변화 추이

나) 청정에너지 성장세 지속

태양광 발전 설치와 전기자동차 판매 증가세가 다음 [그림 Ⅲ-12]와 같이 2021년 발표된 IEA의 2050 넷제로 글로벌 에너지 부문 로드맵 보고서의 전망치와 일치하는 등 긍정적인 변화도 발생하고 있다.



※ 자료: IEA(2023.9.26.), Net Zero Roadmap: A Global Pathway to Keep the 1.5°C Global in Research-2023 Update

[그림 Ⅲ-12] 기 발표 태양광발전 및 배터리 프로젝트 증가 전망

또한 각국의 정부에서는 코로나19 및 러시아 우크라이나 침공 등에 따른 세계 에너지 위기 대응을 위해 다양한 청정에너지의 기술 도입 가속화를 위한 조치를 발표했으며, 산업계에서도 청정에너지 기술 공급을 확대하기 위한 다방면의 노력을 하고 있다. 따라서 2023년 개정 넷제로 시나리오에서는 지금까지의 태양광 및 배터리 제조 규모 확대 계획이 완성되는 것을 가정하면 2030년 목표를 충분히 달성할 것으로 전망되고 있다.

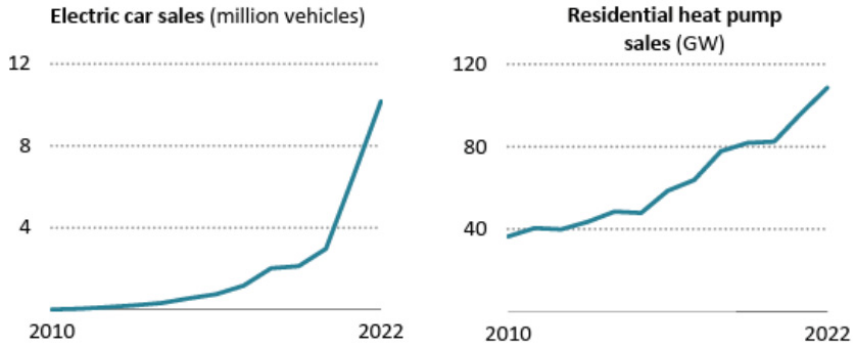
(2) 2050 탄소중립 실현을 위한 도전과제

가) 재생에너지 보급 확대, 효율 개선 및 화석연료 수요 감축

넷제로 시나리오에서는 2030년까지 글로벌 재생에너지 발전설비 용량이 3배로 확대되어 11,000GW가 되면 최대 배출량의 감소 효과가 있을 것으로 전망하고 있다. 특히 태양광 및 풍력 등 재생에너지원의 경우 광범위한 사용이 가능하고 신속하게 보급할 수 있어 연간 에너지 집약도가 2배 정도 개선될 것으로 예상됨에 따라 수송용 석유 소비 감소에 따른 배출량 감소, 에너지 안보 강화 및 가격 안정성 개선 등의 효과가 발생할 것으로 전망하고 있다.

나) 전기화 가속 및 메탄 배출 저감

넷제로 시나리오에서는 2030년까지 전기자동차와 히트펌프가 에너지시스템 전반에 걸쳐 전기화를 주도하여 이산화탄소 배출량 저감 목표의 약 20%를 차지할 것으로 전망되고 있다. 그리고 넷제로 시나리오의 핵심 전환점인 전기자동차는 다음 [그림 III-13]과 같이 최근 성장세를 고려하여 신규 판매 자동차의 2/3을 차지할 것으로 전망되고 있다. 또한 2022년 세계 히트펌프 판매량은 다음 [그림 III-13]과 같이 11% 증가하였으며, EU 등 다수의 시장에서는 2030년까지 넷제로 시나리오 달성에 필요한 약 20%의 연간 성장률을 보이고 있다. 특히 에너지 부문에서의 이산화탄소와 메탄 배출량 감축은 1.5℃ 목표 달성에 핵심 사항으로 2030년까지 메탄 배출량 75% 감축은 최저 비용으로 단기적·효율적으로 지구 온난화를 억제할 수 있는 현실적 수단이다.

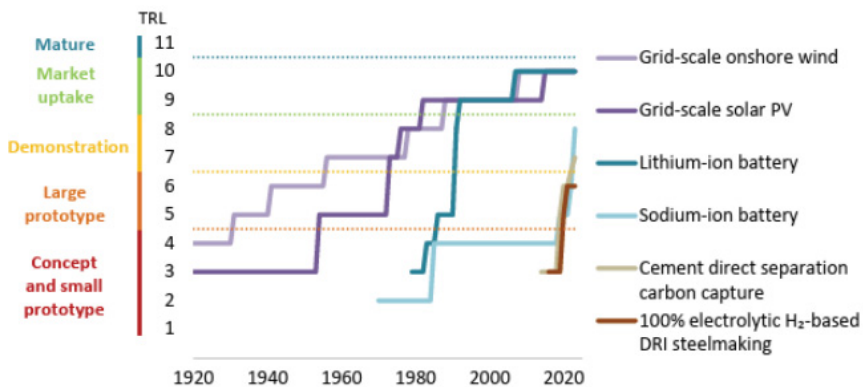


※ 자료: IEA(2023.9.26.), Net Zero Roadmap: A Global Pathway to Keep the 1.5°C Global in Research-2023 Update

[그림 Ⅲ-13] 글로벌 전기차 및 히트펌프 판매량 변화

다) 혁신을 통한 새로운 도구 개발

2021년 넷제로 시나리오에서는 2050 넷제로 달성에 필요한 배출 저감량의 약 50%를 담당하는 기술이 개발 예정 기술이었으나, 2023년 넷제로 시나리오에서는 약 35% 정도로 낮아져 주요 청정에너지의 기술 성숙도가 다음 [그림 Ⅲ-14]와 같이 변화되고 있다.



※ 자료: IEA(2023.9.26.), Net Zero Roadmap: A Global Pathway to Keep the 1.5°C Global in Research-2023 Update

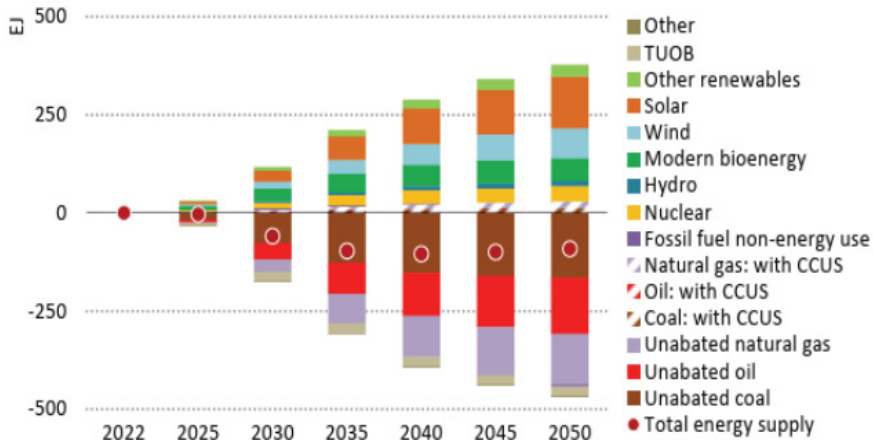
[그림 Ⅲ-14] 주요 청정에너지 기술 성숙도 변화

라) 인프라 부문 성과 창출

현재 기술 수준은 대부분 소규모의 모듈형 청정에너지 기술(태양광, 에너지 저장장치 등)에 국한되어 넷제로 달성이 불가능한 상황으로, 대규모의 스마트 인프라 네트워크 및 인프라 용도 변경, 대규모 저탄소 연료 공급, 굴뚝과 대기에서의 탄소 포집 기술, 더 많은 원자력 발전설비, 재생에너지 개발을 위한 대규모 부지 확보 등이 필요할 것이다. 또한 넷제로 시나리오의 필수 수요를 충족시키기 위해서는 2030년까지 전력 송·배전망이 연간 약 200만km까지 확대될 필요성을 제기하고 있다.

마) 석탄, 석유 및 가스 투자 불필요

넷제로 시나리오에서는 다음 [그림 III-15]와 같이 석탄, 석유 및 가스 등 화석연료의 수요가 2030년까지는 25% 이상, 2050년까지는 80% 이상으로 축소됨에 따라 강력하고 효율적인 청정에너지 보급이 촉진될 것으로 전망하고 있다.



※ 자료: IEA(2023.9.26.), Net Zero Roadmap: A Global Pathway to Keep the 1.5°C Global in Research-2023 Update

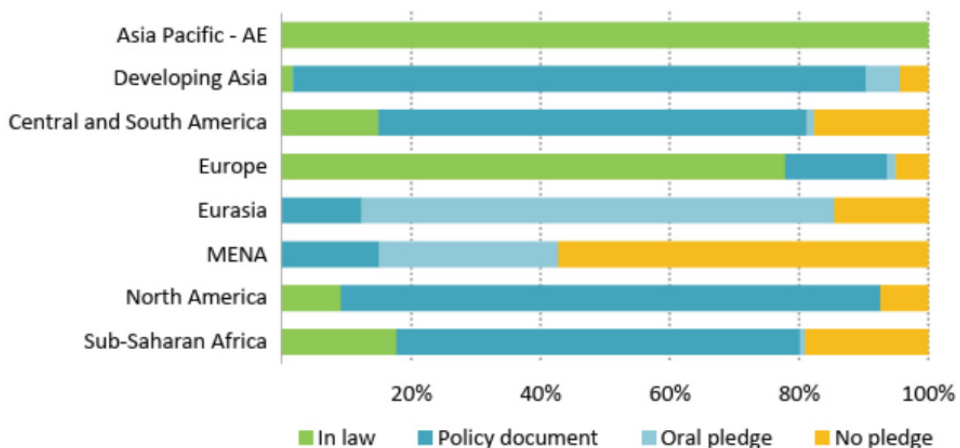
[그림 III-15] 넷제로 시나리오의 에너지믹스 전망

바) 넷제로 탄소배출 전환의 안정성 및 수용성

넷제로 시나리오에서는 전기에너지가 글로벌 에너지 시스템의 새로운 석유 개념으로 성장하기 때문에 안정적인 전력공급이 무엇보다도 중요하다고 예상하고 있다. 또한 전력 시스템에서는 회복력(Resilience)의 필요성이 점차 대두되기 때문에 배터리 등 에너지 저장설비의 대규모 증가와 수요 반영, 사이버 공격으로부터 안전한 송·배전망 확대 및 현대화, CCUS와 연계한 화력, 수력, 바이오메스, 원자력, 수소 및 암모니아 기반 발전소 등 급전이 가능한 탄소 저배출 발전설비가 요구된다.

(3) 지구 온난화 1.5°C 억제를 위한 국제공조

2035년까지 주요 선진국의 탄소 배출량은 다음 [그림 Ⅲ-16]과 같이 2022년 대비 80% 감축, 신흥국 및 개발도상국에서는 60%가 각각 감축되어야 한다. 현재 국가결정기여(NDC)는 각국의 넷제로 배출 약속에 부합하지 않으며, 각국의 넷제로 약속만으로는 2050 넷제로 경로에 안착하기가 충분하지 않다.



※ 자료: IEA(2023.9.26.), Net Zero Roadmap: A Global Pathway to Keep the 1.5°C Global in Research-2023 Update

[그림 Ⅲ-16] 각국 NDC 포함 탄소 배출량 저감 목표

또한 2050년 넷제로 시나리오에서는 목표 달성 시점을 선진국은 2045년경, 중국은 2050년, 기타 신흥국 및 개발도상국은 2050년 이후로 각각 예상된다. 그러나 글로벌 차원의 넷제로 시나리오임에도 불구하고 글로벌 각국에서는 각국의 자원과 상황에 따라 개별 이행경로를 따를 수밖에 없지만 넷제로 달성을 위한 공정한 경로 이행 차원에서 각국이 제시한 넷제로 목표 달성 시점을 앞당기는 노력을 촉구하고 있다.

4) 정부 정책

(1) 제11차 전력수급기본계획(실무안)

가) 전력수요 전망

정부는 반도체 클러스터 조성에 따른 반도체 및 인공지능(AI) 산업 규모 증가로 데이터 센터 및 관련 산업의 전기화 수요가 예측치 이상으로 증가할 것으로 예상하고 관련 전력수요를 제11차 전력수급기본계획에 추가로 반영하였다. 특히, 인공지능 산업의 확장성으로 인해 반도체 및 데이터 센터 전력수요가 2030년에는 2023년 기준 2배 이상 증가할 것으로 전망되고 있다.

나) 전력공급 계획

정부에서는 '23년 3월 발표한 「국가 탄소중립녹색성장 기본계획」의 에너지 전환 부분의 2030년 국가온실가스감축(NDC) 목표가 400만 톤 상향과 관련하여 제11차 전력수급기본계획이 이행된다면 NDC 목표를 달성할 수 있을 것으로 다음 <표 III-5>와 같이 예측한다.

〈표 Ⅲ-5〉 발전량 및 발전비중(안)

(단위 : TWh, %)

구분	원전	석탄	LNG	신재생	수소 암모니아	기타	합계	탄소	
								탄소	무탄소
2030년	204.2 (31.8)	111.9 (17.4)	160.8 (25.1)	138.4 (21.6)	15.5 (2.4)	10.6 (1.7)	641.4 (100)	301.9 (47.1)	339.4 (52.9)
2038년	249.7 (35.6)	72 (10.3)	78.1 (11.1)	230.8 (32.9)	38.5 (5.5)	32.5 (4.6)	701.7 (100)	209.1 (29.8)	492.6 (70.2)

* 무탄소에너지: 원전+신재생+수소·암모니아-연료전지·IGCC

또한, 재생에너지 확대에 따른 안정적 전력 계통 운영을 위해 2038년까지 21.5GW의 에너지저장장치(ESS)가 필요한 것으로 분석되고 있다.

(2) 분산에너지 활성화 특별법 시행

작년 6월 제정 「분산에너지 활성화 특별법」이 2024.6.14.부터 시행되고 있다. 태양광 및 풍력 등 재생에너지원이 확대되었으나, 에너지원 특성상 기상 의존도가 높고 출력량 조정에 한계가 있어 안정적 전력 수급이 어렵다. 이에 분산 에너지법은 중앙 집중형의 한계를 극복하고 재생에너지원 확대를 지원하고자 도입되었다. 다음 〈표 Ⅲ-6〉과 같이 기존 전력 시스템과 분산 에너지 시스템을 각각 비교하였다.

〈표 Ⅲ-6〉 기존 전력시스템과 분산에너지 시스템 비교

구분	기존	미래
기본방향	대규모 발전소 기반의 집중형 발전	지역 중심의 분산형 발전
	원거리 해안가 발전 수도권 내 소비	지역 단위 내 에너지 생산소비
인프라	송전망 기반 전국적 네트워크	지역 중심의 배전 네트워크
거래	경제 규모 중심의 전력시장	자가 소비, 수요지 인근 거래

(3) '25년 IEC 백서

국가기술표준원 보도자료('24.05.20.)에 따르면 IEC에서는 매년 차기 표준화가 필요한 대상 과제를 공모 및 선정하여 미래 유망기술의 표준화 추진 방향을 설정하고 있는데, 우리나라가 제안한 「중전압직류 배전망 기술³⁾」이 채택되었다.

따라서 우리나라가 「중전압직류 배전망 기술」 관련 2025년 IEC 백서(白書) 발간을 주도함에 따라 세계시장에서 우위를 선점할 수 있을 것으로 예상하고 있다.

5) 언론보도

전기에너지 변화 관련 언론보도 내용을 다음 <표 III-7>과 같이 정리하였다.

<표 III-7> 전기에너지 변화 관련 언론보도

구분	주요 내용
전기저널 (‘24.5.9.)	DC 배전으로의 전환은 새로운 전력환경에 대비하는 미래 지향적인 변화라고 할 수 있다. DC 배전 시스템의 도입은 신재생에너지 증가에 따른 DC 부하의 증가에 대응하는 기존 AC 시스템의 여러 문제점을 해결하는 실용적인 접근방식이 될 것으로 전망하고 있다.
전력신문 (‘24.6.21.)	한전은 배전 4종, 송변전 7종의 기능 자격 연령제한을 전면 폐지한다고 발표하였다. 또한 걱정 수준 이상의 건강을 유지하는 고령층 숙련 노동자의 일자리 확대 및 보장하고, 노인인구 1,000만 명 시대에 대비하고자 새로운 근로 기준을 제시하였다.
SBS[현장탐사] (‘24.7.11.)	AI 산업이 발전하고 데이터 센터도 증가하면서 전력수요가 크게 증가하고 있으나, 송전시설 확충이 연기되고 있어 발전소에서 전기를 수요 장소로 보낼 방법이 없는 상황이다.

3) 중전압직류 배전망 기술: 고압직류(≥100kV) 전로와 저압직류 지선을 연결하는 직류 배전 망으로, 에너지 전환에 따른 수요 증가 등으로 2029년 세계 시장은 약 15조 원 규모로 예상(출처: TechSci Research)

〈표 Ⅲ-7〉 (계속)

구분	주요 내용
오마이뉴스 (‘24.8.10.)	제11차 전력수급기본계획에 따르면 핵발전 중심으로 구성되어 기후위기 시대에 기후위기 해결방안이 포함되어 있지 않았다. 애플, 구글 같은 기업은 RE100을 기 선언하였으며, 애플의 경우 납품되는 제품의 제조 및 생산, 운반과 포장 등 모든 과정에서 어떤 에너지를 사용하는지를 고려하고 있다.
산경e뉴스 (‘24.4.8.)	분산에너지법 6월부터 시행, 국내 기술기준 제개정 및 산업계 직류화 확대 필요성 제기 중. 한전, DC얼라이언스 결성 위한 발전포럼 개최를 통해 DC실증사업 에너지효율 향상 결과를 발표함. 직류배전 경제성 분석결과, 연간 1.05조 투자비용 절감 및 36TWh 사용량(5.8조원)절감 가능. 전문가들 “1GW 발전기 5대 대체 시 제주도 연간 전력사용량의 6배 확보 효과가 있다”라고 언급함.
전기저널 (‘24.5.9.)	세계 DC 배전 시장 규모는 꾸준히 증가추세를 보인다. 미국 시장조사업체 리포트링커에 따르면 글로벌 직류 배전망 시장은 2020년 141억달러(18조원)에서 2027년에는 236억달러 규모로 커질 전망이다. 우리나라 정부 및 기업들도 DC 배전 관련 기술 및 제품들을 개발하며 적극적으로 시장 선점에 나서고 있다.
전기저널 (‘24.10.15.)	분산형 발전원의 관리와 에너지 저장 믹스를 함께 고려해야 할 필요성이 커질 것이며, 국내 에너지 현안에 대응하고 에너지 안보를 강화하기 위해 국가 차원의 에너지 저장기술 포트 폴리오를 구축해야 한다. 이러한 맥락에서 장주기 에너지 저장기술은 대용량 장주기 저장이 가능하고 전력망 내에서 폭넓게 활용될 수 있는 기술로, 재생에너지 확대에 따른 계통 불확실성을 해소하는 ‘에너지 안보 솔루션’(ESS)으로서 중요한 역할을 할 것으로 기대된다.
더나은미래 (‘24.11.10)	10월 9일 국제에너지기구(이하 IEA)는 2030년까지 재생에너지가 전 세계 전력 수요의 절반가량을 차지할 것이라고 보고했다. 그러나 재생에너지 용량을 3배로 늘리겠다는 유엔 목표는 달성이 어려울 것으로 보인다.

2. 위험 예측 및 대응

본 장에서는 미래 전기에너지의 변화를 국내·외 동향을 분석하고 그 결과를 토대로 관련 위험 예측을 예측하고 대응 방안을 검토한다. 다만, 산업안전 측면에서의 위험 예측 및 대응에는 한계가 있어 포괄적인 범위 내에서만 확인하였다.

1) 직류전원 확대

신재생에너지원 확대에 따라 100년 넘게 교류 기반으로 운영해오던 교류전력 시스템에 직류전력 시스템이 점진적으로 추가 및 확대되고 있다. 또한 미래 전력 시스템에서는 직류 설비는 효율적이지만, 사고 예방을 위한 기술 등 안전관리 방안이 미흡하다.

교류전력에는 누전차단기, 아크차단기, 서지보호기 등 안전장치 등 상용화 되어 있지만, 현재까지 직류전력에는 보호 수단이 부재하거나 기술 수준이 낮은 상황이다. 특히 직류배전이 실증단계를 거쳐 상용화되는 경우 직류는 전류가 일정하게 흐르기 때문에, 직류전력 계통 차단이 어려울 뿐만 아니라 아크 소호가 용이하지 않아 직류 전용의 차단기 등 보호 수단의 개발·보급이 시급하다. 그리고 교류 및 직류 등 하이브리드망에서의 기존 누전차단기, 아크차단기 및 서지보호기 등과의 보호 및 협조 체계 구축도 필요하다.

또한, 직류는 교류보다는 용량성 성분 영향이 거의 없어서 대지와와의 전압 차이가 일정하여 절연파괴 현상이 교류보다는 쉽게 발생한다. 따라서 전선과 설비의 절연성능이 중요하며 이를 위해 실증 실험·연구가 필요하다. 또한, 직류 계통에서도 접지는 감전 및 전기화재 사고 예방을 위해 필수적인 요소로 국제 표준화가 필요하다.

직류 설비 또한 주기적인 모니터링과 안전 점검이 필요한 상황으로 배선, 접속부, 단자대 및 차단기 상태 등의 정기적 점검을 통해 사고를 예방해야 한다. 아직까지는 국내 기준이 명확하지 않기 때문에 관련 연구와 산업현장에서의 사각지대 해소를 위한 제도 마련이 시급하고, 안전관리 인력에 대한 역량 강화를 위한 교육과 함께 안전작업 매뉴얼 제정도 필요하다.

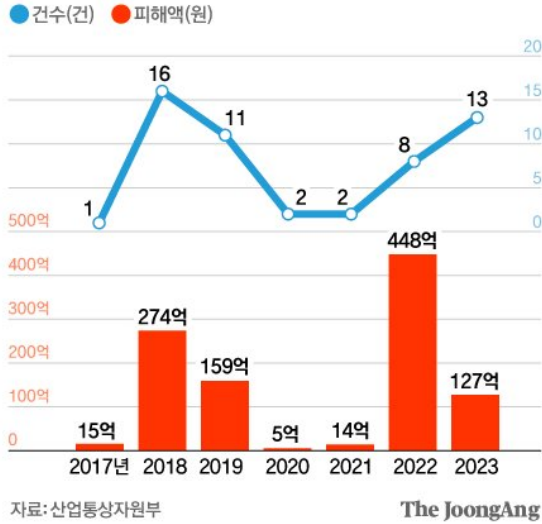
2) 태양광·풍력 에너지저장장치 화재

태양광 및 풍력 등 재생에너지원은 기상 상황에 따라 발전량이 변화하기 때문에 변동성을 완화하기 위한 에너지저장장치(ESS)도 같이 설치하게 된다. 그런데 이러한 에너지저장장치는 다양한 화재 위험성을 내포하고 있고, 향후 재생에너지원 발전 비중이 증가함에 따라 에너지저장장치도 동반 증가가 예상되기 때문에, 제조업체에서도 전고체 배터리⁴⁾ 등 화재 위험성이 낮은 차세대 개발에 주력할 필요성은 있다.

산업통상자원부와 소방청에 따르면 다음 [그림 Ⅲ-17]과 같이 2023년 발생한 에너지저장장치(ESS)의 화재 발생 건수가 13건으로 2022년 8건보다 약 2배 증가하였다. 2021년 2건과 비교하면 약 6배 이상으로 증가하였다. 다만 에너지저장장치 화재 발생 건수가 2022년 8건에서 2023년 13건으로 다시 증가하였지만, 실시간 모니터링으로 인한 초기 진화율이 증가하여 전소율이 크게 낮아져 피해액은 감소하였다.

4) 배터리 양극과 음극 사이에 있는 전해질을 기존 액체에서 고체로 대체한 차세대 배터리로 2차전지 수요기업에서는 전고체 전지 사용화 계획을 발표하고 있다.

다시 늘어나는 ESS 화재



※ 출처: <https://www.joongang.co.kr/article/25259990> [중앙일보]

[그림 III-17] 태양광·풍력 에너지저장장치 화재발생 건수 및 피해액

3) 전기자동차

(1) 전기자동차 위험요인 분석

전기자동차의 충돌 등 교통사고로 인해 배터리 구성요소에 물리적 손상 즉, 배터리 보호 외함 또는 고전압 전선을 손상이 발생하면, 수리 및 정비 작업 시 감전, 화재·폭발로 이어질 수 있다. 다음 <표 III-8>과 같이 전기자동차 정비 작업 시 유해·위험 요인을 정리하였다.

직류 60볼트 이상의 전압은 고전압으로 분류되며 인체 감전 가능성도 있다. 전기 이륜차의 경우 48볼트 범주에 속하지만, 전기자동차의 경우 전압이 200~800볼트로, 고전압의 위험성이 증가하였기 때문에, 전기자동차 수리 특별한 주의가 필요하다. 전기자동차 내부에는 주행을 위한 다양한 용도의

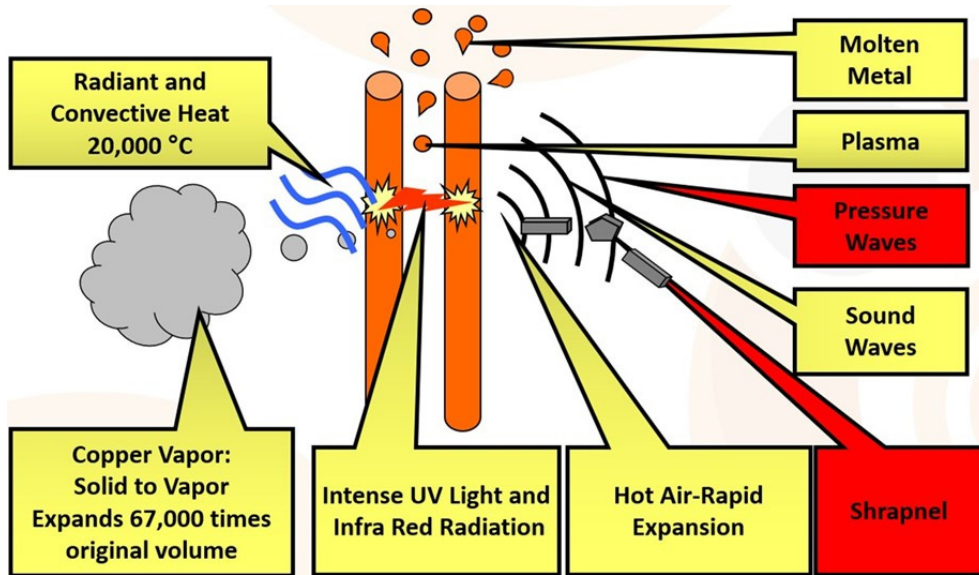
전선이 결선되어 있는데, 일반적으로 저전압과 고전압 두 가지 범주로 구분한다. 저전압은 검정색으로, 고전압은 주황색으로 구분한다. 이때, 정비 작업자가 고전압 배터리가 분리되지 않은 상태에서 보호구를 착용하지 않았을 경우 감전 위험성은 높아진다. 그리고 전기자동차용 배터리 팩에는 수백개의 개별 셀이 포함되어 있는데 단위 셀 당 공칭전압은 3.5~4.2볼트이다. 또한 전기자동차 구동 모터 내부의 영구자석에서의 전자기장 영향이 심장 박동 조절기나 생물의학 장비 또는 임플란트를 사용하는 작업자에게 재해를 유발할 수 있다.

(2) 전기자동차 아크 플래쉬 위험

전기자동차의 리튬 이온 배터리는 여러 개의 개별 셀로 구성되어 있다. 각 셀의 전압은 다양할 수 있지만 일반적으로 완전히 충전되면 약 4.2 Vdc가 되고, 충전 값이 낮아지더라도 셀의 전압은 약 3 Vdc가 될 수 있다. 전기 자동차의 배터리는 여러 개의 이러한 리튬 이온 셀이 서로 연결되어 있어 배터리는 1000 Vdc에 가까운 전압을 생성할 수 있으며 병렬 아크 발생 시 1000 암페어의 아크 플래시 전류를 생성할 수 있습니다.

〈표 Ⅲ-8〉 전기자동차 정비작업 시 유해위험요인

구분	주요 내용
고전압 위험	<ul style="list-style-type: none"> 전기자동차는 200~800볼트 범위의 고전압 배터리 시스템을 사용하는데 고전압으로 인해 상당한 위험을 초래할 수 있음 전기자동차 정비작업 후 배터리 충전 단자에 접촉 가능성 높음
배터리 위험	<ul style="list-style-type: none"> 배터리 유지보수시 열폭주를 포함하는 화재·폭발 발생 위험이 있으며, 리튬이온 배터리는 화재·폭발 위험에 더 취약함
화학물질 노출	<ul style="list-style-type: none"> 배터리 유지보수시 냉각수, 윤활제, 세척제 등 인체에 유해한 다양한 화학물질에 노출될 수 있음
기계적 위험	<ul style="list-style-type: none"> 전기자동차도 내연기관 차량과 유사하게 무거운 부품 또는 장비를 취급해야 하므로 기계적 위험성을 내포하고 있음 배터리 무게만 400kg이상 중량물로 끼임 등의 재해 발생 위험이 있음



※ 출처: Electrical Safety UK, Holistic Electrical Safety Management

[그림 III-18] 아크 플래쉬 발생시 위험요인

전기자동차 아크 플래쉬 위험성은 “입사에너지”로 노출될 수 있는 잠재적 위험 수준을 계산할 수 있다. 여기서 입사에너지가 높을수록 위험성은 커지며, 입사에너지는 일반적으로 cal/cm^2 또는 J/cm^2 로 표시할 수 있다. 그리고 착용할 수 있는 아크 플래시 개인 보호 장비(PPE)도 cal/cm^2 또는 J/cm^2 로 평가된다. 예를 들면, PPE의 등급이 입사에너지 수준보다 높으면 아크 플래시가 발생하는 경우 최악의 영향으로부터 보호될 수 있다.

다음 <표 III-9>에서는 전기자동차 아크 플래쉬 위험에 따른 안전조치 사항을 규정하고 있다.

〈표 Ⅲ-9〉 아크 플래쉬 위험 관련 안전조치 사항

입사에너지 (cal/cm ²)	주요 내용
> 8	<ul style="list-style-type: none"> • 사고 에너지를 줄이기 위해 위험 감소 조치를 고려하거나 에너지가 공급되는 전기작업을 제거하기 위한 작업절차 개선 필요 • 부상 위험을 완화하기 위해 PPE 시스템이 설치되는 경우 PPE 시스템의 안전성능이 작업할 전기 장비에 대해 계산된 입사에너지 값을 초과하도록 시험 및 인증되어야 함.
1.2 - 8	<ul style="list-style-type: none"> • 입사에너지를 합리적인 수준으로 감소시킬 수 없다면 일반적인 아크 플래쉬 보호구 외 적절한 위험 통제 조치와 함께 안전한 전기 안전작업 절차 마련 필요
< 1.2	<ul style="list-style-type: none"> • 아크 사고 발생 시 2도 화상을 입을 가능성이 낮으므로 아크 등급 PPE가 필요하지 않으나, 진단 및 시험 등의 작업 시 손과 같은 신체 부위에 대한 추가 보호장치를 착용하는 것이 적절함.

※ 출처: Electrical Safety UK, Holistic Electrical Safety Management에서 재정리

또한, 전기자동차의 아크 플래쉬 위험성은 입사에너지에 의해 결정되는데, 아크 플래쉬에 노출되기 쉬운 전기자동차 유지보수 작업을 다음 〈표 Ⅲ-10〉과 같이 정리하였다. 전기자동차 유지보수 작업은 안전하게 수행할 수 있지만 인적 오류나 장비 고장으로 인해 아크 플래시 사고 발생할 수 있다는 점을 인식하고 안전교육 실시 및 안전 작업절차 마련이 중요하다.

〈표 Ⅲ-10〉 전기자동차 정비 관련 작업 및 영향요인

구분	관련 작업 및 영향 요인
공통	<ul style="list-style-type: none"> • 수공구 및 전동공구 사용, 전기 구성품 절연결함 • 회로 오동작, 교육훈련 미흡 및 기상조건 • 시험 및 테스트
배터리	<ul style="list-style-type: none"> • 배터리 분리, 운반 및 조립 등 취급 • 배터리 관련 시스템 유지보수 • 전기자동차 사고 후 배터리 취급
케이블	<ul style="list-style-type: none"> • 배터리 단자와 케이블 결선 및 분리 • 전기자동차 구성품 케이블 결선 및 분리, 점검 등
기계구성품	<ul style="list-style-type: none"> • 주요 구성품 교체 및 변경 • 전기 모터 교체

(3) 전기자동차 관련 작업 안전조치

일반적으로 전기자동차 정비 및 유지보수 작업 시 무엇보다도 배터리 등 전기에너지원으로부터 작업 대상을 격리 및 이격하고 해당 지점을 고정하고 표기한다. 그리고 도전성 부품을 만지기 전에 마지막으로 활선 여부를 검전기로 시험한다.

특히 배터리 시스템의 경우 배터리 자체가 전원 공급원이기 때문에 전기 에너지원으로부터 작업 대상을 격리 및 이격할 수 없다. 따라서 배터리 직접 취급하거나 주변에서의 작업하는 경우 배터리 충전량을 감소시키는 것이다. 만약 충전량이 감소하게 되면 아크를 발생시킬 수 있는 충분한 에너지가 존재할 수 있지만 사고로 인한 아크의 잠재적인 입사에너지가 크게 감소한다. 이때 연결 또는 융합 링크를 통해 직렬로 연결된 배터리의 경우 링크를 제거하면 큰 용량의 배터리를 작은 용량의 배터리로 효과적으로 분할시킴으로써 배터리 충전전압이 감소한다. 이러한 조치를 통해 아크 플래시가 발생하는 경우 노출될 수 있는 잠재적인 입사에너지가 다시 크게 줄어들 수 있다.

그리고 전기자동차 정비작업 시 국제 기술표준(BS, EN, IEC)에 따라 제작된 절연 도구 및 장치를 사용해야 한다. 전기자동차 정비 및 유지보수 작업시 배터리 단자대와 우발적인 접촉을 방지하기 위해 충전분에 절연 슈라우드를 설치해야 한다. 또한 국제 기술표준(BS, EN, IEC)에 따라 제작된 테스트 장비 및 테스트 리드를 사용하여 정비작업을 수행한다. 마지막으로 작업자는 적절한 등급의 아크 플래시 개인 보호구(PPE)를 착용하여야 한다.

4) 해상풍력

(1) 국내 해상풍력 사업 관련 안전보건 법·제도 부재

유럽, 미국, 아시아 (대만, 호주 등) 타 국가의 경우 해상풍력 안전보건에 대한 정부 기관 (예: 호주 - Offshore Infrastructure Regulator, 미국 - Bureau of Safety and Environmental Enforcement 등) 주도하의 기존 Occupational Safety & Health Act (산업안전보건법) 및 에너지 (특히, Oil & Gas) 또는 해양 인프라 관련 법규와 연계한 해상풍력 안전보건 관련 별도 regulatory framework 등을 제/개정하여 운영하고 있으며, 관련 법규 등 제/개정 시 산업 이해관계자(예: 개발사, 공급망, 협회 등)와의 상호 consultation 등을 통한 의견 청취/조율/협의 등 실시하고 있다.

그러나 우리나라의 경우 아직 해상풍력 관련 안전보건에 관한 법·제도/지침 등이 명확하지 않은 상태로, 해상풍력 개발~공사~운영 각 단계별로 어떠한 법률이 정확하게 적용되어야 하는지에 대한 각 이해관계자 (개발사, 공급망 등)의 이해 및 해석이 상이하다.

초기 개발단계에서도 환경 조사, 해양 지질조사 등을 위해 여러 물리적인 작업/조사 활동 (특히 선박을 이용한 해역에서의 조사)이 상당수 진행되는데, 국내 인프라/자원의 부족 등으로 여전히 외국 선박/장비/인력 등을 이용한 조사 활동 또는 국내 영세한 기업들과 조사 활동을 진행할 수밖에 없는 상황이며, 실제 현상을 보면 외국기업의 경우⁵⁾ 국내 법규에 대한 이해가 부족하고, 또한 국내 기업의 경우 해상풍력 안전보건에 대한 명확한 법규 및 지침이 미흡하다 보니 작업 준비 단계에서 정확히 어떠한 법규를 따라야 하는지에 대한 이해도 부족하고, 사고/문제 발생 시 관계 부처에 대한 파악부터 어떠한 대응을 해야 하는지 등에 대한 준비가 현실적으로 미흡한 상황이다. 예를 들어, 해상에서

5) 대부분 국제 기준 및 Best Practice 기반으로 진행 중이며, 보통 법적 기준보다는 조금 더 엄격한 기준으로 이해하지만, 정확히 국내 법규와 어떠한 차이점이 있고, 때로는 국내 법상 요구되는 사항이 누락될 수도 있다.

사고 발생 시 1차로 해경에 신고 및 구조 지원 등 요청하지만, 사고 이후 어떠한 방식으로 관계 부처 간 사고에 대한 정보가 공유되고, 어떠한 후속 조치가 이루어져야 하는지 등에 대한 정보나 이해가 부족하며, 이로 인한 각 회사별 사전 준비/대응이 현재는 충분하지 못할 것으로 사료 된다.

해상풍력 특성상 육상 변전소/케이블 부분 등을 제외하고는 대부분 해상에서의 조사 활동 및 작업이 다수를 차지하는데, 우선 해상에서의 작업에 대해서는 고용노동부보다는 해수부 또는 에너지 사업 특성상 산업부가 주 관계 부처인 것으로 이해하고 있다. 그러나 실제 소관 부처에서 안전보건에 대해 얼마나 깊게 관여하고 있는지, 또는 향후 어떤 방식으로 관여할 것인지에 대한 정보도 부족하며, 실제 국내 산업안전보건을 주로 다루고 있는 고용노동부/한국산업안전보건공단과의 협업 및 업무 연계 등에 대해서도 어떻게 이루어지는지 명확한 지침 및 안내 등이 필요하다. 이를 바탕으로 해상풍력 각 이해관계자(예: 개발사, 공급망 등)별 안전보건에 대한 법적 역할과 책임을 명확히 하고, 이를 준수하기 위한 세밀한 관리/수행 방안을 수립하여 이행 방안을 마련하여야 한다.

(2) 국내/외 해상풍력 안전보건 워크숍 등 논의사항

가) 교육 및 훈련

해상풍력의 경우 Global Wind Organization(GWO)에서 실시하는 Basic Safety Training(BST)를 기본적으로 수료하도록 대부분의 개발사가 요구하고 있다. 그러나 국가별 산업 형태/특성 등을 고려하여 GWO 교육 외 법적으로 요구되는 해상풍력 산업에 대한 산업안전보건 교육 특히, 각 직종별에 대한 명확한 지침이 필요하다.

나) Medical Fitness

해상 작업에 참여하기 위해서는 대부분 글로벌 개발사에서 주로 국제 Oil & Gas 산업에서 요구하는 OGUK 등 국제적인 medical certificate를 대부분

요구하고 있다. 특히, 해상풍력의 경우 육지에서 먼 곳은 70~80km 이상 떨어진 곳에서 고소, 중량물 권상 등 고위험 작업 등이 많이 발생하다 보니 사전 작업 인원에 대한 건강 및 fitness to work 체크 등이 매우 중요하다. 그러나 법적으로 고위험 해상 작업을 위한 어떠한 자격이 있어야 하는지, 어떠한 건강검진을 받고 적합 판정을 받아야 하는지 등에 대한 명확한 기준이 없다. 따라서 국가 별로 명확한 medical check/fitness 관련 규정 수립 요청이 많은 것으로 확인되었다.

다) 비상대응 및 구조

산업안전보건 측면에서 비상 대응 계획은 매우 중요한 부분이며, 실제 일부 국가에서는 정부 부처와 개발사/공급망 간에 해상풍력 단지에서 발생하는 비상 상황 (예: 선박 사고, 인적 사고, 환경 사고 등)에 대한 각 이해관계자들의 책임과 역할을 법적으로 명확히 하고, 이행하고자 하는 움직임이 있다. 예를 들어 대만의 경우 해상풍력 단지 내로 선박이 동력을 잃고 밀려오는 경우 해당 풍력단지 소유주/개발사가 직접 해당 선박을 구조하도록 요청하고 있다. 또한 호주의 경우 해상에서 이루어지는 작업의 승인을 받기 위해 Management Plan을 수립하고 관계 부처에 제출해야 하며, Management Plan에는 비상대응 계획도 함께 반영되어야 한다. 그럼에도 불구하고 어느 정도 수준의 구체적인 대응계획이 수립되어야 하는지 등에 대한 다양한 논의가 이루어지고 있어, 구체적인 실행 방안 수립까지는 많은 관심과 노력이 필요하다.

(3) 개선필요 사항

가) 관계부처 별 명확한 업무 분장

해상풍력 특성상, 해양수산부 및 산업통상자원부가 본 사업에 대한 정책/인·허가 등 많은 부분을 담당할 것이고, 산업안전보건 측면에서는 고용노동부가 담당할 것이다. 향후 부처 간 어떻게 업무 분장을 하고 각 부처별 역할과 책임을

명확하게 하여, 해상풍력 사업에 참여하는 개발사 및 공급망 회사들이 이를 바탕으로 정확한 안전보건 관리 및 비상 대응체계를 수립/이행할 수 있도록 해야 할 필요성이 있다.

특히, 국내 해상풍력의 경우 아직 초기 개발단계에 있는 곳이 많고, 대부분 해외 글로벌 개발사 위주로 사업이 진행되고 있기에, 국내 해상풍력 안전보건 법 및 그 법에 대한 각 주무 부처가 명확해야지만 각 회사별 산업안전보건에 대한 법적 의무이행을 정확히 이해하고 철저히 이행할 수 있을 것이다.

나) 해상풍력 산업 특성에 대한 이해와 안전보건 규정 명확화

해상풍력 개발~공사~운영 쏠 주기(Life-Cycle)에 걸쳐 각 작업들의 특성과 참여 기업형태 등을 보면, 해양 조사, 부품/구조물 제조, 연구, EPC/건설사/중공업 등 다양한 직종의 기업이 참여하고 있다. 각 공사 단계별/작업별 형태 및 관계 법규도 다양할 것이며, 예를 들면 해상풍력 관련 부품/구조물 제작의 경우 제조업에 속할 것이고, 실제 운송/설치는 건설공사에 속할 것이다.

쏘 주기(Life-Cycle)에 걸쳐 사업을 주관하는 개발사의 입장에서는 도급/용역/건설공사 발주 등의 다양한 개념을 명확히 이해/해석하고 각 작업 단계별 의무이행 사항을 명확히 규정/절차에 반영하여 수행해야 하는데, 위에서 언급한 다양한 형태의 작업이 연속적인 단계에 걸쳐 진행된다. 따라서 단계별 연계 구간에서는 법규에 대한 명확한 해석과 준비/이행에 있어 어려움이 있어 사각지대가 발생할 수 있다. 예를 들면 국내 한 대기업에서 EPC turnkey 형식으로 해상풍력 하부 구조물 제작/운송/설치 관련 계약을 체결하는 경우, 정확히 언제/어디서부터 건설공사 범위에 속하게 되는지, 이에 따라 산업안전보건관리비 계상 시 대상액 선정은 어떻게 해야 하는지 등 세부적인 법적 요구사항들을 놓고 보면 여전히 회색지대가 발생할 것이다. 또한, 해상풍력은 고정식과 부유식으로 구분하는데, 고정식과 부유식 각각 적용되는 법규도 상이할 것이며, 추가적인 논의/조율이 필요성이 있다.

5) 중·단기 에너지 안보 위험 요인

중·단기적으로 세계 석유·가스 수요의 증가세는 둔화되지만, 수요 정점 도달 시점까지 석유·가스 안보는 계속 중요할 것으로 예상된다.

또한 중·단기적으로 전력수요 증가 및 변동적 재생에너지 비중 증가에 따른 전력시스템 불안정, 디지털화에 따른 사이버 위험, 그리고 기후위험 등의 극복을 위한 적정성(adequacy), 운영 안정성(operational security), 회복 탄력성(resilience) 제고 등의 필요성이 증대할 것으로 예상된다.

그리고 에너지 시스템의 디지털화로 인해 사이버 위험이 증가로 인해, 그 피해도 광범위하게 확대될 수 있으며, 따라서 에너지 시스템의 사이버 회복 탄력성(cyber-resilience) 향상을 위한 적극적인 노력이 요구된다. 마지막으로 에너지와 자연 자원(물, 풍력, 태양 등) 간의 상호 의존성은 앞으로 더욱 증가할 것임에 따라 에너지와 물을 종합적·효율적으로 이용하는 방법 모색을 통해 기후 회복력을 높이면, 이상기온 현상에 의한 피해와 손실을 줄일 수 있다. 또한 청정에너지로의 전환을 촉진하여 더 빠른 전기화를 가능케 하며, 기후변화에 민감한 재생에너지로의 전환 가속화에 기여할 것으로 예상된다.

다음 <표 Ⅲ-11>은 중단기 에너지 안보 위험요인 분석 내용을 토대로 전력 시스템 변화와 다양한 전력 안보 요인에 대한 잠재적 영향을 나타내고 있다.

〈표 III-11〉 전력시스템 변화와 다양한 전력안보 요인에 대한 잠재적 영향

구분		유연성	연료공급 안보	적절성	기후 회복력	사이버 회복력	동시 위기상황
가변적 재생에너지 비중 증가	전력안보 영향	감소	증가	감소	불확실/실행에 따라 상이	중립	불확실/실행에 따라 상이
	상대적 중요성	높음	중간	낮음	높음	낮음	중간
화력 발전량 감소	전력안보 영향	감소	증가	감소	불확실/실행에 따라 상이	중립	증가
	상대적 중요성	높음	낮음	높음	중간	낮음	낮음
저탄소 급전가능 발전원의 역할 감소 (원전, 수력)	전력안보 영향	감소	감소	감소	불확실/실행에 따라 상이	중립	불확실/실행에 따라 상이
	상대적 중요성	높음	중간	높음	중간	낮음	중간
분산화 (분산발전, ESS 등)	전력안보 영향	증가	증가	불확실/실행에 따라 상이	증가	불확실/실행에 따라 상이	증가
	상대적 중요성	낮음	낮음	중간	중간	중간	낮음
디지털화 (연결성, 자동화)	전력안보 영향	증가	증가	증가	증가	불확실/실행에 따라 상이	증가
	상대적 중요성	중간	낮음	중간	중간	높음	낮음

※ 자료: IEA(2020), Power Systems in Transition: Challenges and opportunities ahead for electricity security, 이성규(2024) 재작성.

3. 소결

미래의 전기에너지 패러다임은 기존의 중앙 집중식 공급 모델에서 벗어나, 더 효율적이고 지속 가능한 방향으로 급격한 변화가 예상된다. 그리고 이러한 변화는 기술적 혁신, 환경적 요구, 그리고 글로벌 에너지 시장의 변화에 따라 주도될 것이다.

1) 신재생에너지 확대 보급

탄소배출 감축과 기후 변화 대응을 위한 필수적인 요소인 신재생에너지의 비율이 급증할 것입니다. 여기서 태양광, 풍력, 수력 등과 같은 청정에너지가 핵심적인 역할을 하며, 기술 발전과 더불어 에너지 저장 기술(배터리, 수소 저장 등)의 혁신이 이루어짐에 따라, 신재생에너지의 간헐성 문제도 해결될 수 있다.

2) 분산형 에너지 시스템

미래의 전기에너지 시스템은 분산형으로 변화가 예상된다. 이는 중앙에서 공급하는 방식이 아니라, 각 가정이나 소규모 시설에서 자체적으로 전기를 생산하고 소비하는 구조로, 스마트 그리드와 결합하여 효율적으로 전기에너지를 관리할 수 있다. 이런 분산형 에너지 시스템은 전력망의 안정성을 높이고, 에너지 자립을 가능하게 하며, 소비자 주도의 에너지 관리를 촉진할 것입니다.

3) 스마트 그리드와 IoT

스마트 그리드와 사물인터넷(IoT) 기술의 발전은 에너지 효율성을 극대화하고, 실시간으로 에너지 소비 패턴을 모니터링하고 조정하는 데 중요한 역할을 할

것이다. 스마트 그리드는 전력망을 디지털화하여, 에너지의 흐름을 최적화하고 전력수요와 공급을 실시간으로 조정함으로써, 전력 낭비를 줄이고 비용을 절감하는 데 기여할 수 있다.

4) 전기차(EV)와 에너지저장장치(ESS)

전기차의 확산은 전기에너지 패러다임에 큰 변화를 가져올 것으로 예상된다. 전기차는 단순히 이동 수단에 그치지 않고, 에너지저장장치로서 기능을 할 수 있는 가능성을 가지고 있다. Vehicle-to-Grid(V2G) 기술을 활용하여, 전기차는 전력망의 수요와 공급을 조절하는 중요한 역할을 하게 될 것이며, 전기가 에너지 저장 분야에서 새로운 축을 형성할 것이다.

5) 에너지 효율성 향상

미래의 전기에너지 시스템은 에너지 효율성 향상에 중점을 두고 발전할 것이다. 스마트가전, 고효율 LED 조명, 에너지 절감 건축물 등은 전기에너지 소비를 줄이고, 최소한의 에너지로 최대의 성과를 낼 수 있다. 또한, 산업 분야에서도 에너지 효율을 높이는 기술이 지속적으로 발전하면서, 에너지 소비를 줄이고 지속 가능한 생산 방식을 도입하게 될 것이다.

6) 정책 및 글로벌 협력

전 세계적인 에너지 변화는 단지 기술적인 문제뿐만 아니라, 정책적 지원과 글로벌 협력이 중요한 요소로 작용하기 때문에 글로벌 정부는 탄소중립 목표를 설정하고, 이에 맞는 에너지 전환 정책을 추진하고 있다. 따라서 국제적인 협력을 통해, 에너지 기술과 혁신을 공유하고, 글로벌 에너지 시장을 위한 규제와 협정이 중요하다.

IV. 전기에너지 관련 법·제도, 기술 개선방안



IV. 전기에너지 관련 법·제도, 기술 개선방안

1. 법·고시 사각지대

1) 중대재해 원인분석

최근 10년간(2013년~2022년) 감전 중대재해 원인분석 결과를 토대로 현재의 문제점을 확인하고 시사점 도출을 통해, 과거와 현재를 기반으로 향후 예상되는 감전사고 관련 사회적 이슈 등을 예측하였다.

중대재해 조사의견서 분석 결과 현재까지는 감전사고 패러다임이 과거와 유사한 경향을 보이고 있으나, 일부 감전 중대재해 사례에서는 몇 가지 시사점을 확인하였다.

첫 번째, 산업구조 및 고용 형태 변화에 따라 법·제도와 기술과의 공백 현상으로 사각지대 및 회색지대가 발생하고 있다. 두 번째, 감전 중대재해의 경우 발생 매커니즘이 명확하고 경향성이 유사하지만, 다른 발생형태의 중대재해와 달리 뚜렷한 감소 추세를 보이지 않고 있다. 무엇보다도 예방 대책이 명확하고 단순함에도 불구하고, 중대재해 발생이 감소 추세를 보이지 않는 점은 안전조치의 현장 작동성 문제와 함께 전기에너지 특성상 사전 안전조치가 이행되었더라도 작업 과정 및 기계·설비 관리에서 배리어(Barrier)가 쉽게 무너지는 경향성이 있다. 세 번째, 현재까지는 과거의 감전 중대재해 패러다임과 뚜렷한 차별성은 없지만 몇 가지 사례의 경우 산업구조 및 고용형태 변화에 따른 경향성이 다른 감전 중대재해도 확인하였다.

마지막으로 전기에너지 및 인체감전 특성에 기인하는 데이터 부족으로 중대재해 원인조사 시 객관적·과학적 조사가 어렵다는 점이다. 특히 인체 통전전류와 연관성을 가지는 인체저항에 대한 정확한 파악은 어려운 상황이다.

2) 사각지대 발굴

(1) 산업안전보건법 및 기준규칙 현행화

가) 산업안전보건법 시행규칙 제26조(교육시간 및 교육내용 등)

특별교육 대상 작업 교육, 사전조사 및 작업계획서의 작성 등 및 적용 제외 항목에서 기준전압 관련 명칭(대지전압, 선간전압), 크기(30V, 50V, 75V) 등이 상이하여 부합성을 검토할 필요성이 있다.

1. 근로자 안전보건교육 제26조제1항 관련 라. 특별교육 대상 작업 교육

17. 전압이 75볼트 이상인 정전 및 환선작업	<ul style="list-style-type: none"> ○ 전기의 위험성 및 전격 방지에 관한 사항 ○ 해당 설비의 보수 및 점검에 관한 사항 ○ 정전작업·환선작업 시의 안전작업방법 및 순서에 관한 사항 ○ 절연용 보호구, 절연용 보호구 및 환선작업용 기구 등의 사용에 관한 사항 ○ 그 밖에 안전·보건관리에 필요한 사항
----------------------------	--

2. 산업안전보건기준에 관한 규칙 제38조(사전조사 및 작업계획서의 작성 등)

제38조(사전조사 및 작업계획서의 작성 등)

① 사업주는 다음 각 호의 작업을 하는 경우 근로자의 위험을 방지하기 위하여 별표 4에 따라 해당 작업, 작업장의 지형·지반 및 지층 상태 등에 대한 사전조사를 하고 그 결과를 기록·보존해야 하며, 조사결과를 고려하여 별표 4의 구분에 따른 사항을 포함한 작업계획서를 작성하고 그 계획에 따라 작업을 하도록 해야 한다. <개정 2023.11.14.>

1. 타워크레인을 설치·조립·해체하는 작업
2. 차량계 하역운반기계등을 사용하는 작업(화물자동차를 사용하는 도로상의 주행작업은 제외한다. 이하 같다)
3. 차량계 건설기계를 사용하는 작업
4. 화확설비와 그 부속설비를 사용하는 작업
5. 제318조에 따른 전기작업(해당 전압이 50볼트를 넘거나 전기에너지가 250볼트암페어를 넘는 경우로 한정한다)

3. 산업안전보건기준에 관한 규칙 제324조(적용 제외)

제324조(적용 제외)

제38조제1항제5호, 제301조부터 제310조까지 및 제313조부터 제323조까지의 규정은 대지전압이 30볼트 이하인 전기기계·기구·배선 또는 이동전선에 대해서는 적용하지 아니한다.

나) 산업안전보건기준에 관한 규칙

중대재해 조사의견서 분석 결과 및 미래 전기에너지 환경 변화를 고려하여 다음 <표 IV-1>과 같이 「산업안전보건기준에 관한 규칙」의 현행화 필요성을 검토하였다.

<표 IV-1> 산업안전보건기준에 관한 규칙 현행화 검토

주안점	조항	검토 내용
명확화	제32조(보호구의 지급 등)제1항제3호	<ul style="list-style-type: none"> 정전기 대전에 의한 위험방지를 위해 보호구로 안전화를 규정하고 있으나 그 외 보호구 지급 법적 근거는 없음
사각지대 해소	제38조(사전조사 및 작업계획서의 작성등)제1항제5호	<ul style="list-style-type: none"> 고압선 정전작업 및 활선작업에 대해서만 규정하고 있으나, 저압에서 감전 사고사망이 다수 발생하고 있어, 전기작업의 경우 작업계획서 작성 대상에 포함 필요
명확화	제70조(시스템비계의 조립 작업 시 준수사항)제3호	<ul style="list-style-type: none"> 중대재해 원인분석 결과에 따르면 감전재해의 다수는 비계 해체 시 발생하고 있으나, 가공전로에 근접하여 비계를 설치하는 경우로 규정하고 있음 비계를 해체하는 경우에 대한 안전조치 규정이 명확하지 않음 「가공전로」를 「충전전로」 변경 및 통일 검토
현행화	제302조(전기 기계·기구의 접지)제1항제2호제라목	<ul style="list-style-type: none"> 국내·외 기술 표준과 상이함
현행화	제304조(누전차단기에 의한 감전방지)제1항	<ul style="list-style-type: none"> 국내·외 기술 표준과 상이함
사각지대 해소	제308조(비상전원)제1항	<ul style="list-style-type: none"> 비상전원에 비상발전기, 비상전원용 수전설비, 축전지 설비, 전기저장장치 등을 포함되어 있으나, 축전지 설비 및 전기저장장치 등에 안전기준 부재
사각지대 해소	제310조(전기 기계·기구의 조작 시 등의 안전조치)제2항	<ul style="list-style-type: none"> 방염 처리된 작업복 또는 난연 성능을 가진 작업복 안전성능 기준의 근거 부재

〈표 IV-1〉 (계속)

주안점	조항	검토 내용
현행화	제318조(전기작업자의 제한)	<ul style="list-style-type: none"> • 유해·위험작업의 취업 제한에 관한 규칙과 연계성 검토 필요
명확화	제320조(정전전로 인근에서의 전기작업)	<ul style="list-style-type: none"> • 중대재해 분석결과에 따르면 다수의 감전재해는 정전과 활선 혼재구간에서 발생하고 있음 • 전기작업 대상 및 범위를 고려하여 정전과 활선 구간에 대한 명확한 정의 규정 필요
현행화	제321조(충전전로에서의 전기작업)제1항 제7호 및 8호	<ul style="list-style-type: none"> • 전압 적용구간에 따라서 유자격자와 무자격자 근로자의 충전전로 접근 한계거리가 역전 • 중대재해 원인분석 결과에 따라 유자격자가 아닌 근로자의 작업 장소에 대한 검토 필요
현행화	제324조(적용 제외)	<ul style="list-style-type: none"> • 안전전압을 대지전압 30볼트 이하로 규정하고 있으나, 국내·외 기술 표준과 상이함
사각지대 해소	제326조(피뢰설비의 설치)	<ul style="list-style-type: none"> • 기후변화 등으로 낙뢰 발생빈도가 증가함에 따라 피뢰설비의 설치 대상을 화약류 또는 위험물을 저장하거나 취급하는 시설물에서 신재생에너지 설비 등을 포함하여 확대 검토 필요
사각지대 해소	-	<ul style="list-style-type: none"> • 태양광 감전 및 화재 사고 예방을 위한 안전기준 및 기술수단 부재 * 어레이 출력 개폐기, 과전류 및 지락보호장치, 아크검출장치
사각지대 해소	-	<ul style="list-style-type: none"> • 풍력터빈 유지보수 및 점검 시 블레이드 불시 기동에 따른 작업자 안전성 확보 방안 부재

① 산업안전보건기준에 관한 규칙 제32조제1항제3호

산업안전보건기준에 관한 규칙 제32조제1항제3호에서는 「사업주는 감전 또는 정전기의 대전에 의한 위험이 있는 작업을 하는 근로자에 대해서는 안전화를 지급하고 착용하도록 하여야 한다」라고 규정하고 있다. 그리고 동 규칙 제325조(정전기로 인한 화재 폭발 등 방지)제2항에서는 「사업주는 인체에 대전된 정전기에 의한 화재·폭발 위험이 있는 경우에는 정전기 대전방지용 안전화 착용, 제전복 착용, 정전기 제전용구 사용 등의 조치를 하거나 작업장 바닥 등에 도전성을 갖추도록 하는 등 필요한 조치를 하여야 한다」라고 규정하고 있다.

그러나 감전에 의한 위험이 있는 작업을 하는 근로자는 절연성 안전화를, 정전기 대전에 의한 위험이 있는 작업을 하는 근로자는 도전성 안전화를 착용해야 하므로 감전에 의한 위험과 정전기 대전에 의한 위험이 있는 작업을 구분하여 표기할 필요가 있다. 또한 제325조제2항에서 규정하고 있는 제전복 및 정전기 제전 용구 등의 경우에는 명확한 안전성능 기준이 부재하여 제조사 등의 시험성적서를 토대로 안전성능을 확인하는 실정으로 안전성능 기준에 대한 근거 마련이 필요하다.

② 산업안전보건기준에 관한 규칙 제70조제3호

산업안전보건기준에 관한 규칙 제70조제3호에서는 「사업주는 가공전로¹⁾에 근접하여 비계를 설치하는 경우 가공전로를 이설하거나 가공전로에 절연용 방호구를 설치하는 등 가공전로와의 접촉을 방지하기 위한 필요한 조치를 하여야 한다」라고 규정하고 있다. 또한 산업안전보건법 시행령 제11조(도급인 지배·관리하는 장소)제9호에서는 공중 전선에 가까운 장소로서 시설물의 설치·해체·점검 및 수리 등의 작업을 할 때 감전의 위험이 있는 장소를 도급인이 지배·관리하는 장소로 규정하고 있다.

1) [다산에듀 전기용어사전] 전력을 보내거나 통신을 할 수 있도록 공중에 설치한 전로 또는 애자나 지지대 등의 수단에 의하여 공중에 설치하는 전로, [표준국어대사전] 공중에 설치한 전선을 모두 가공전로로 표기함

그러나 중대재해 조사의견서 분석 결과에 따르면, 비계를 설치하는 경우를 포함하여 해체하는 경우 충전부 접촉에 의한 감전재해가 발생하고 있다. 그리고 감전 중대재해 기인물에는 공중에 설치된 전선 즉 가공전로를 포함하여 수·변전설비 등도 포함되기 때문에, 「가공전로」로 국한하기보다는 포괄적인 개념인 「전로」²⁾로 표기하는 것을 검토할 필요가 있다.

③ 산업안전보건기준에 관한 규칙 제302조제1항2호라목

다음 <표 IV-2>에서 산업안전보건기준에 관한 규칙의 접지 조항을 한국전기설비규정(KEC)과 비교하였다.

<표 IV-2> 접지 관련 한국전기설비규정(KEC) 비교



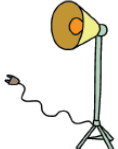
산업안전보건기준에 관한 규칙	한국전기설비규정(KEC)
<p>① 사업주는 누전에 의한 감전의 위험을 방지하기 위하여 다음 각 호의 부분에 대하여 접지를 해야 한다. (개정 2021.11.19.)</p> <p>1. 전기 기계·기구의 금속제 외함, 금속제 외피 및 철대</p> <p>2. 고정 설치되거나 고정배선에 접속된 전기기계·기구의 노출된 비충전 금속체 중 충전될 우려가 있는 다음 각 목의 어느 하나에 해당하는 비충전 금속체</p> <p>가. 지면이나 접지된 금속체로부터 수직거리 2.4미터, 수평거리 1.5미터 이내인 것</p> <div data-bbox="283 1262 618 1500" style="text-align: center;"> </div> <p>나. 물기 또는 습기가 있는 장소에 설치되어 있는 것</p> <p>다. 금속으로 되어 있는 기기접지용 전선의 피복·외장 또는 배선관 등</p> <p>라. 사용전압이 대지전압 150볼트를 넘는 것</p>	<p>142.7 기계기구의 철대 및 외함의 접지</p> <p>1. 전로에 시설하는 기계기구의 철대 및 금속제 외함(외함이 없는 변압기 또는 계기용 변성기는 철심)에는 140에 의한 접지공사를 하여야 한다.</p> <p>2. 다음의 어느 하나에 해당하는 경우에는 제1의 규정에 따르지 않을 수 있다.</p> <p>가. 사용전압이 직류 300 V 또는 교류 대지전압이 150 V 이하인 기계기구를 건조한 곳에 시설하는 경우</p> <hr/> <p>243.18 저압 육내 직류전기설비의 접지</p> <p>1. 저압 육내 직류전기설비는 전로 보호장치의 확실한 동작의 확보, 이상전압 및 대지 전압의 억제 등을 위하여 직류 2선식의 임의의 한 접 또는 변환장치의 직류측 중간점, 태양전지의 중간점 등을 접지하여야 한다. 다만, 직류 2선식을 다음에 따라 시설하는 경우는 그러하지 아니하다.</p> <p>가. 사용전압이 60 V 이하인 경우</p> <p>나. 접지접속기를 설치하고 특정구역내의 산업용 기계기구에만 공급하는 경우</p> <p>다. 교류전로로부터 공급을 받는 정류기에서 인출되는 직류계통</p> <p>라. 최대전류 30 mA 이하의 직류화재경보회로</p> <p>마. 절연감시장치 또는 절연고장점검출장치를 설치하여 관리자가 확인할 수 있도록 경보장치를 시설하는 경우</p> <p>2. 제1의 접지공사는 140의 규정에 의하여 접지하여야 한다.</p> <p>3. 직류전기설비를 시설하는 경우는 감전에 대한 보호를 하여야 한다.</p> <p>4. 직류전기설비의 접지시설은 243.1.6에 준용하여 전기부식방지를 하여야 한다.</p> <p>5. 직류접지계통은 교류접지계통과 같은 방법으로 금속제 외함, 교류접지도체 등과 분당하여야 하며, 교류접지가 피뢰설비·통신접지 등과 통합접지되어 있는 경우는 함께 통합접지공사를 할 수 있다. 이 경우 낙뢰 등에 의한 과전압으로부터 전기설비 등을 보호하기 위해 KS C IEC 60364-5-53(전기기기의 선정 및 시공-절연, 개폐 및 제어)의 “534 과전압 보호장치”에 따라 서지보호장치(SPD)를 설치하여야 한다.</p>

2) [전기용어사전] 전력을 공급하기 위해서 구성된 도선과 그 지지물 등의 시설물로 전기에너지가 공급되는 도체와 이를 구성하는 전체 시스템을 말한다.

④ 산업안전보건기준에 관한 규칙 제304조제1항

다음 <표 IV-3>에서 누전차단기 관련 산업안전보건기준에 관한 규칙과 한국전기설비 규정(KEC)을 비교한 것으로, 한국전기설비 규정에서는 직류 전로에는 직류 전원용 지락차단장치(RCD, Residual Current Device)를 설치하도록 규정하고 있다.

<표 IV-3> 누전차단기 관련 한국전기설비규정(KEC) 비교

산업안전보건기준에 관한 규칙	한국전기설비규정(KEC)
<p>① 사업주는 다음 각 호의 전기 기계·기구에 대하여 누전에 의한 감전위험을 방지하기 위하여 해당 전로의 정격에 적합하고 감도(전류 등에 반응하는 정도)가 양호하며 확실하게 작동하는 감전방지용 누전차단기를 설치해야 한다. <개정 2021.11.19.></p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 대지전압이 150볼트를 초과하는 이동형 또는 휴대형 전기기계·기구 2. 물 등 도전성이 높은 액체가 있는 습윤장소에서 사용하는 저압(1.5천볼트 이하 직류 전압이나 1천볼트 이하의 교류 전압을 말한다)용 전기기계·기구  <ol style="list-style-type: none"> 3. 철판·철골 위 등 도전성이 높은 장소에서 사용하는 이동형 또는 휴대형 전기기계·기구  <ol style="list-style-type: none"> 4. 임시배선의 전로가 설치되는 장소에서 사용하는 이동형 또는 휴대형 전기기계·기구 	<p>243.1.3 저압 직류과전류차단장치</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 212.3.4에 의하여 저압 직류전로에 과전류차단장치를 시설하는 경우 직류단락전류를 차단하는 능력을 가지는 것이어야 하고 “직류용” 표시를 하여야 한다. 2. 다중전원전로의 과전류차단기는 모든 전원을 차단할 수 있도록 시설하여야 한다. <p>243.1.4 저압 직류지락차단장치</p> <p>211.2.4에 의하여 저압 직류전로에 지락이 생겼을 때 자동으로 전로를 차단하는 장치를 시설하여야 하며 “직류용” 표시를 하여야 한다.</p>

⑤ 산업안전보건기준에 관한 규칙 제308조제1항

산업안전보건기준에 관한 규칙 제308조제1항에서는 「사업주는 정전에 의한 기계·설비의 갑작스러운 정지로 인하여 화재·폭발 등 재해가 발생할 우려가 있는 경우에는 해당 기계·설비에 비상 발전기, 비상 전원용 수전설비, 축전지 설비, 전기저장장치 등 비상 전원을 접속하여 정전시 비상 전원이 공급되어야 한다」 라고 규정하고 있다.

여기서 에너지저장장치(ESS)는 전기에너지 저장이 어렵고 사용 후 없어지는 전기에너지를 효율적으로 사용·저장 및 관리하는 시스템으로, 발전소, 송·배전 시설, 가정, 기업 및 공장 등에서 신재생에너지와 연계 또는 전기로 절감하고, 정전 피해를 최소화하고자 백업 전력으로 사용이 확대되는 추세이다. 또한 ESS는 남은 전력을 저장한 후에 수요가 많은 시간대 또는 전기료가 비싼 시간대에 저장된 전력을 사용함으로써, 정전 피해를 최소화하고 전력 요금을 절감할 수 있어 산업현장에서는 정전 시 비상 전원 공급 용도와 에너지 비용 절감 대책으로도 활용하고 있다.

통상적으로 에너지저장장치(ESS)는 구축 및 공급은 도급사업 형태로 운용되며 사업시설의 안전관리, 점검 및 유지보수 등은 수급인이 전담하고 있으며, 도급인이 안전보건 조치를 수행해야 하나 계약서상의 도급 관계에 대한 구분이 명확하지 않고 도급인과 수급인의 안전관리 역할과 책임이 명확하지 않다.

따라서 도급인과 수급인의 자원점유, 인력 고용, 전문 도급(위험도급 포함) 관계에 따라 도급인 또는 수급인 책임주의 및 공동 책임주의로 구분하여 관리가 필요하다. 또한 에너지저장장치 자체 화재 위험성에 대한 기술적 문제도 고려되어야 한다.

⑥ 산업안전보건기준에 관한 규칙 제310조제2항

산업안전보건기준에 관한 규칙 제310조제2항에서는 「사업주는 전기적 불꽃 또는 아크에 의한 화상의 우려가 있는 고압 이상의 충전전로 작업에 근로자를

중대재해 조사·의견서 분석 결과에 따르면 방염처리된 작업복 또는 난연성능을 가진 작업복을 착용시켜야 한다」라고 규정하고 있다.

중대재해 조사·의견서 분석 결과에 따르면 전기적 불꽃 또는 아크에 의한 화상은 고압 이상의 충전전로를 포함한 저압 충전전로에서도 발생하고 있어 작업 범위를 충전전로 작업으로 확대할 필요가 있다. 특히 직류전원의 경우 이중지락에 의한 병렬아크 발생시 전기적 불꽃 또는 아크에 의한 화상 위험에 더 취약하기 때문에 추가적인 검토가 필요하다. 또한 방염 처리된 작업복 또는 난연성능을 가진 작업복에 대한 명확한 안전성능 기준 부재로, 제조사 등의 시험성적서를 토대로 안전성능을 확인하는 실정으로 안전성능 기준에 대한 근거 마련이 필요하다.

⑦ 산업안전보건기준에 관한 규칙 제318조

산업안전보건기준에 관한 규칙 제318조에서는 「사업주는 근로자가 감전 위험이 있는 전기기계·기구 또는 전로의 설치·해체·정비·점검 등의 작업(“전기작업”)을 하는 경우 「유해·위험작업의 취업제한에 관한 규칙」 제3조에 따른 자격·면허·경험 또는 기능 갖춘 사람(“유자격자”)이 작업을 수행하도록 해야 한다」라고 규정하고 있다.

중대재해 조사·의견서 분석 결과에 따르면 전체 감전 중대재해 186건 중 48.4%인 90건이 전기작업 중에 발생하였다. 그리고 전기작업 90건 중 52.2%인 47건이 재해자의 자격 여부가 확인되지 않거나 자격이 없는 것으로 확인되었으며, 전기작업임에도 불구하고 17.8%인 16건이 비전기작업 작업자가 수행하였거나 전기작업자 여부가 확인되지 않았다.

따라서, 전기작업의 유자격자의 세부 자격 및 작업 범위는 「유해·위험작업의 취업제한에 관한 규칙」과 연계하여 검토 예정이다.

⑧ 산업안전보건기준에 관한 규칙 제320조

산업안전보건기준에 관한 규칙 제320조에서는 「사업주는 근로자가 전기 위험에 노출될 수 있는 정전전로 또는 그 인근에서 작업하거나 정전된 전기기기 등과 접촉할 우려가 있는 경우에 작업 전에 제319조제2항3호의 조치³⁾를 확인하여야 한다」라고 규정하고 있다.

이는 정전전로 또는 그 인근에서 작업하거나 정전된 전기기기 등에 전원의 불시 투입을 방지하기 위해 작업전에 차단장치나 단로기 등에 잠금장치 및 꼬리표(LOTO) 부착 여부 확인을 규정하고 있다.

중대재해 조사의견서 분석 결과에 따르면 전체 감전 중대재해 186건 중에서 작업 전 작업 대상에 대한 ①전원 차단 여부는 미차단이 90.8%인 169건, 전원 차단이 15건, 전원 차단 흔적이 2건이었으며, ②작업 중 작업 대상의 활선 여부는 흔적이 14건, 활선이 172건이었다.

⑨ 산업안전보건기준에 관한 규칙 제321조제1항제7,8호

산업안전보건기준에 관한 규칙 제321조제1항제7호에서는 유자격자가 아닌 근로자가 충전전로 인근의 높은 곳에서 작업할 때에 근로자의 몸 또는 긴 도전성 물체가 방호되지 않은 충전전로에서 대지전압이 50킬로볼트 이하인 경우에는 300센티미터 이내로, 대지전압이 50킬로볼트를 넘는 경우에는 10킬로볼트당 10센티미터씩 더한 거리 이내로 각각 접근할 수 없도록 규정하고 있다. 그리고 제8호에서는 유자격자가 충전전로 인근에서 작업하는 경우에는 ①근로자가 노출 충전부로부터 절연된 경우 또는 해당 전압에 적합한 절연장갑을 착용한 경우, ②노출 충전부가 다른 전위를 갖는 도전체 또는 근로자와 절연된 경우 그리고 ③근로자가 다른 전위를 갖는 모든 도전체로부터 절연된 경우를 제외 하고는 노출 충전부에 다음 표에 제시된 접근한계거리 이내로 접근하거나 절연 손잡이가 없는 도전체에 접근할 수 없도록 규정하고 있다.

3) 차단장치나 단로기 등에 잠금장치 및 꼬리표를 부착할 것

그러나 충전전로에서의 전기작업 시 접근 한계거리를 유자격자는 선간전압, 유자격자가 아닌 근로자는 대지전압을 기준으로 규정하고 있다. 따라서 적용되는 기준전압의 종류가 상이하여 전압 적용구간에 따라 유자격자와 유자격자가 아닌 근로자의 충전전로에 대한 접근 한계거리가 역전되는 경우가 발생하고 있어 충전전로에서의 전기작업 시 유자격자와 유자격자가 아닌 근로자를 구분하여 기준전압과 접근한계거리 산정 방법에 대한 명확화가 필요하다.

〈충전전로의 선간전압별 접근 한계거리〉

충전전로의 선간전압 (단위:킬로볼트)	충전전로에 대한 접근 한계거리 (단위:센티미터)
0.3 이하	접촉금지
0.3 초과 0.75 이하	30
0.75초과 2 이하	45
2초과 15 이하	60
15 초과 37이하	90
37 초과 88 이하	110
88 초과 121이하	130
121 초과 145 이하	150
145 초과 169 이하	170
169초과 242 이하	230
242 초과 362 이하	380
362 초과 550이하	550
550 초과 800이하	790

예를 들어 선간전압이 500kV인 충전전로에서 전기작업을 하는 경우 유자격자 근로자는 산업안전보건기준에 관한 규칙 제321조제8호의 표에서 362초과 550이하 구간에 해당되므로 접근한계거리는 550cm이다. 그러나 유자격자가 아닌 근로자는 선간전압⁴⁾ 500kV를 대지전압으로 환산하면 288kV이며, 이때

4) 전력선의 전선과 전선사이의 전압

대지전압⁵⁾이 50kV를 초과하기 때문에 기본 300cm에 50kV 초과분에 대한 240cm를 더하면 접근한계거리는 540cm이다. 즉 충전전로에 대한 접근한계 거리가 유자격자가 아닌 근로자가 540cm로 유자격자 근로자의 접근한계거리 550cm보다 더 짧다.

⑩ 산업안전보건기준에 관한 규칙 제324조

산업안전보건기준에 관한 규칙 제324조(적용 제외)에서는 「제38조제1항제5호, 제301조부터 제310조까지 및 제313조부터 제323조까지의 규정은 대지전압이 30볼트 이하인 전기기계·기구, 배선 또는 이동전선에 대해서는 적용하지 않는다」라고 규정하고 있다. 즉, 제311조(폭발위험장소에서 사용하는 전기 기계기구의 선정 등), 제312조(변전실 등의 위치), 제4절 정전기 및 전자파로 인한 재해예방을 제외한 제3장 전기로 인한 위험 방지에서 안전전압⁶⁾을 30볼트 이하로 규정하고 있다.

이는 한국전기설비규정(KEC), IEC 및 NEC에서는 50볼트 이하로 규정하고 있어 현행화 및 최신화가 필요한 부분이다. 참고로 한국전기설비규정(KEC) 개정⁷⁾에 따라 산업안전보건기준에 관한 규칙에서도 저압의 기준을 1,500V 이하의 직류전압 또는 1,000V 이하의 교류전압으로 개정⁷⁾하였다.

⑪ 산업안전보건기준에 관한 규칙 제326조

기후변화 등으로 낙뢰 발생빈도가 증가함에 따라 피뢰설비의 설치 대상을 화약류 또는 위험물을 저장하거나 취급하는 시설물에서 신재생에너지 설비 등을 포함하는 확대 검토가 필요하다. 예를 들면, 육상 또는 해상 풍력의 경우 낙뢰로 인한 구조물 붕괴, 화재 및 작업자 감전·화상 등 다양한 사고 발생 위험이 상존하지만 안전조치 사항이 부재한 사각지대로 볼 수 있다.

5) 전력선과 대지사이의 전압, 대지전압=선간전압/ $\sqrt{3}$ = 500kV/ $\sqrt{3}$ =288kV

6) 체코: 20V, 독일: 24V, 일본: 24~30V, 벨기에: 35V, 스위스: 36V, 프랑스: AC 13V, DC50V, 네덜란드: 50V, 오스트리아: 60V(0.5sec)

7) KEC 부합화를 위해 2021.11.19. 개정

다) 유해·위험작업의 취업 제한에 관한 규칙

「유해·위험작업의 취업 제한에 관한 규칙」 제3조제1항 관련 [별표 1]에 따라서 2. 「전기사업법」에 따른 전기설비 등을 취급하는 작업은 「전기사업법」에서 규정하는 자격을 가진 자가 수행하여야 한다. 또한 2의2. 「전기안전관리법」에 따른 전기설비 등을 취급하는 작업은 「전기안전관리법」에서 규정하는 자격을 가진 자가 수행하여야 한다. 그리고 9. 안전보건규칙 제302조제1항제3호다목에 따른 고압의 전로를 취급하는 업무로서 고압선 정전작업(전로를 전개하여 그 지지물을 설치·해체·점검·수리 및 도장 작업) 및 활선작업(고압 또는 특별 고압의 충전전로 또는 그 지지물을 설치·점검·수리 및 도장 작업)은 「국가기술자격법」에 따른 전기기능사, 철도신호기능사 및 전기철도기능사 이상의 자격, 「초·중등 교육법」에 따른 고등학교에서 전기에 관한 학과를 졸업한 사람 또는 이와 같은 수준 이상의 학력 소지자, 「국민 평생 직업능력 개발법」에 따른 해당 분야 직업능력개발훈련 이수자, 관계 법령에 따라 해당 작업을 할 수 있도록 허용된 사람이 수행하여야 한다.

중대재해 조사의견서 분석 결과에 따르면, 고압 이상의 전로를 취급하는 업무보다 저압의 전로를 취급하는 업무에서 발생빈도가 높았으며, 저압의 전로를 취급하는 업무에서 발생한 중대재해의 경우 재해자의 자격 보유 여부를 명확하게 확인할 수 없었다.

그리고 「산업안전보건기준에 관한 규칙」 제318조에 따라서 저압의 전로를 취급하는 업무에 종사하는 근로자도 「유해·위험작업의 취업 제한에 관한 규칙」 제3조제1항을 적용 받기 때문에, 자격·면허·기능 또는 경험을 보유하여야 한다. 그러나 제조업 또는 건설업 근로자의 경우 업종 특성상 「전기사업법」 또는 「전기안전관리법」에서 규정하는 자격을 보유하기가 어렵고, 「초·중등교육법」에 따른 고등학교에서 전기에 관한 학과를 졸업한 경우가 아니면 「국가기술자격법」의 경우 전기기능사, 철도신호기능사 및 전기철도기능사를 취득하기가 현실적으로 쉽지 않다. 또한 「국민 평생 직업능력 개발법」에서 규정하는 교육과정은 고압 이상의 전로를 취급하는 업무 중심으로 구성되어 있다.

따라서, 저압의 전로를 취급하는 업무에 종사하는 근로자의 자격·면허·기능 또는 경험 보유를 위해서는 가장 현실적인 대안으로 「국민 평생 직업능력 개발법」에서 규정하는 교육과정을 확대 운영할 필요가 있다.

그리고 「유해·위험작업의 취업 제한에 관한 규칙」 제3조제2항에서는 해당 작업의 보조자에게는 적용하지 않고 있는데, 이는 보조자의 개념을 적용하지 않는 산업안전보건기준에 관한 규칙 내용과 상충 될 수 있어, 산업안전보건기준에 관한 규칙에서도 작업자와 작업을 보조하는 자에 대한 명확한 규정이 필요하다.

■ 유해·위험작업의 취업 제한에 관한 규칙 [별표 1] <개정 2024. 3. 13.>

자격·면허·경험 또는 기능이 필요한 작업 및 해당 자격·면허·경험 또는 기능
(제3조제1항 관련)

작업명	작업범위	자격·면허·기능 또는 경험
2. 「전기사업법」에 따른 전기설비 등을 취급하는 작업	자격 또는 면허를 가진 사람이 취급해야 하는 업무	「전기사업법」에서 규정하는 자격
2의2. 「전기안전관리법」에 따른 전기설비 등을 취급하는 작업	자격 또는 면허를 가진 사람이 취급해야 하는 업무	「전기안전관리법」에서 규정하는 자격
9. 고압선 정전작업 및 활선작업(活線作業)	안전보건규칙 제302조제1항제3호다목에 따른 고압의 전로(電路)를 취급하는 업무로서 가. 정전작업(전로를 전개하여 그 지지물을 설치·해체·점검·수리 및 도장(塗裝)하는 작업) 나. 활선작업(고압 또는 특별고압의 충전전로 또는 그 지지물을 설치·점검·수리 및 도장작업)	1) 「국가기술자격법」에 따른 전기기능사, 철도신호기능사 및 전기철도기능사 이상의 자격 2) 「초·중등교육법」에 따른 고등학교에서 전기에 관한 학과를 졸업한 사람 또는 이와 같은 수준 이상의 학력 소지자 3) 「국민 평생 직업능력 개발법」에 따른 해당 분야 직업능력개발훈련 이수자 4) 관계 법령에 따라 해당 작업을 할 수 있도록 허용된 사람

「산업안전보건기준에 관한 규칙 제318조」와 「유해·위험작업의 취업제한에 관한 규칙 제3조」에서 전기작업 범위에 관한 사항을 다음 <표 IV-4>와 같이 비교하였다.

<표 IV-4> 전기작업 범위 등 관련 법령 비교

산업안전보건기준에 관한 규칙	유해·위험작업의 취업 제한에 관한 규칙
<p>【제318조(전기작업자의 제한)】 사업주는 근로자가 감전위험이 있는 전기 기계·기구 또는 전로의 설치·해체·정비·점검(설비의 유효성을 장비, 도구를 이용하여 확인하는 점검으로 한정한다) 등의 작업(이하“전기작업”이라 한다)을 하는 경우에는 「유해·위험작업의 취업 제한에 관한 규칙」 제3조에 따른 자격·면허·경험 또는 기능을 갖춘 사람(이하“유자격자”라 한다)이 작업을 수행하도록 해야 한다.</p>	<p>【제3조제1항 관련 별표1】</p> <ul style="list-style-type: none"> • 제2호 전기사업법에 따른 전기설비 등을 취급하는 하는 작업에서 자격 또는 면허를 가진 사람이 취급해야 하는 업무 • 제2호의2 전기안전관리법에 따른 전기설비 등을 취급하는 작업에서 자격 또는 면허를 가진 사람이 취급해야 하는 업무 • 제9호고압선 정전작업 및 활선작업 안전보건규칙 제302조제1항제3호다목에 따른 고압의 전로를 취급하는 업무 가. 정전작업(전로를 전개하여 그 지지물을 설치·해체·점검·수리 및 도장하는 작업) 나. 활선작업(고압 또는 특별고압의 충전전로 또는 그 지지물을 설치·점검·수리 및 도장하는 작업)

「유해·위험작업의 취업 제한에 관한 규칙 제3조」에서 규정하고 있는 자격·면허·경험 및 기능 관련 다음 <표 IV-5>와 같이 전기작업 관련 관계 법령을 파악하고 자격·면허·경험 및 기능 사항을 확인한다.

〈표 IV-5〉 전기작업 관련 관계 법령

연번	법령	세부내용
1	전력기술관리 법령	<ul style="list-style-type: none"> • 전력기술관리법 [법률 제20207호, 2024. 2. 6] • 전력기술관리법 시행령 [대통령령 제34772호, 2024. 7. 30] • 전력기술관리법 시행규칙 [산업통상자원부령 제448호, 2022. 1. 21]
2	전기사업법령	<ul style="list-style-type: none"> • 전기사업법 [법률 제20206호, 2024. 2. 6] • 전기사업법 시행령 [대통령령 제34806호, 2024. 8. 6] • 전기사업법 시행규칙 [산업통상자원부령 제569호, 2024. 8. 7]
3	전기공사사업 법령	<ul style="list-style-type: none"> • 전기공사사업법 [법률 제20205호, 2024. 2. 6] • 전기공사사업법 시행령 [대통령령 제34771호, 2024. 7. 30] • 전기공사사업법 시행규칙 [산업통상자원부령 제497호, 2023. 1. 5]
4	전기안전관리 법령	<ul style="list-style-type: none"> • 전기안전관리법 [법률 제20194호, 2024. 2. 6] • 전기안전관리법 시행령 [대통령령 제33401호, 2023. 4. 11] • 전기안전관리법 시행규칙 [산업통상자원부령 제531호, 2023. 12. 6] • 전기안전관리자의 직무에 관한 고시 [산업통상자원부고시 제2023-82호, 2023. 4. 26]
5	에너지관계 법령	<ul style="list-style-type: none"> • 에너지법 [법률 제19438호, 2023. 6. 13] • 에너지법 시행령 [대통령령 제34496호, 2024. 5. 7] • 에너지법 시행규칙 [산업통상자원부령 제485호, 2022. 11. 21] • 에너지이용 합리화법 [법률 제19001호, 2022. 10. 18] • 에너지이용 합리화법 시행령 [대통령령 제33913호, 2023. 12. 12] • 에너지이용 합리화법 시행규칙 [산업통상자원부령 제542호, 2023. 12. 20] • 신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급 촉진법 [법률 제19040호, 2022. 11. 15] • 신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급 촉진법 시행령 [대통령령 제33466호, 2023. 5. 15] • 신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급 촉진법 시행규칙 [산업통상자원부령 제448호, 2022. 1. 21] • 고효율에너지기자재 보급촉진에 관한 규정 [산업통상자원부고시 제2021-166호, 2021. 10. 25] • 공공기관 에너지이용 합리화 추진에 관한 규정 [산업통상자원부고시 제2024-110호, 2024. 7. 1] • 건축물의 에너지절약설계기준 [국토교통부고시 제2024-421호, 2024. 8. 8]
6	승강기 안전관리 법령	<ul style="list-style-type: none"> • 승강기 안전관리법 [법률 제20159호, 2024. 1. 30] • 승강기 안전관리법 시행령 [대통령령 제34765호, 2024. 7. 30] • 승강기 안전관리법 시행규칙 [행정안전부령 제500호, 2024. 7. 26] • 승강기 설치검사 및 안전검사에 관한 운영규정 [행정안전부고시 제2023-17호, 2023. 3. 21]
7	기타 전기관리 규정	<ul style="list-style-type: none"> • 에너지법 [법률 제19438호, 2023. 6. 13] • 에너지법 시행령 [대통령령 제34496호, 2024. 5. 7] • 에너지법 시행규칙 [산업통상자원부령 제485호, 2022. 11. 21] • 에너지이용 합리화법 [법률 제19001호, 2022. 10. 18] • 에너지이용 합리화법 시행령 [대통령령 제33913호, 2023. 12. 12] • 에너지이용 합리화법 시행규칙 [산업통상자원부령 제542호, 2023. 12. 20] • 신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급 촉진법 [법률 제19040호, 2022. 11. 15] • 신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급 촉진법 시행령 [대통령령 제33466호, 2023. 5. 15] • 신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급 촉진법 시행규칙 [산업통상자원부령 제448호, 2022. 1. 21] • 고효율에너지기자재 보급촉진에 관한 규정 [산업통상자원부고시 제2021-166호, 2021. 10. 25] • 공공기관 에너지이용 합리화 추진에 관한 규정 [산업통상자원부고시 제2024-110호, 2024. 7. 1] • 건축물의 에너지절약설계기준 [국토교통부고시 제2024-421호, 2024. 8. 8]

한국산업인력공단에서 시행하고 있는 국가기술자격 종목 중 전기분야 내용을 다음과 같이 확인하였다. 국가기술자격법에 따른 자격을 명확히 하기 위해 시행 종목 전기분야의 전기기능사, 철도전기신호기능사 이상의 자격으로 명확화가 필요하다.

〈한국산업인력공단 국가기술자격 시행종목 전기 분야〉

The screenshot displays the '국가기술자격' (National Technical Qualification) section. On the left, there is a navigation menu with categories like '국가자격시험' (National Qualification Exam), '자격정보' (Qualification Information), and '자격검정통계' (Qualification Examination Statistics). The '자격정보' section is expanded, showing a list of qualification types including '국가자격' (National Qualification), '민간자격' (Private Qualification), and '외국자격' (Foreign Qualification). The '국가자격' sub-section is further expanded to show '국가기술자격제도' (National Technical Qualification System) and '국가자격종목별상세정보' (Detailed Information by Qualification Category). The '국가기술자격' tab is selected, and a dropdown menu for '전기' (Electricity) is open, showing a list of 18 specific qualification categories:

- 건축전기설비기술사
- 발송배전기술사
- 전기공사기사
- 전기공사산업기사
- 전기기능사
- 전기기능장
- 전기기사
- 전기산업기사
- 전기응용기술사
- 전기철도기사
- 전기철도기술사
- 전기철도산업기사
- 철도신호기사
- 철도신호기술사
- 철도신호산업기사

「국민 평생 직업능력 개발법」 제38조 및 같은 법 시행령 제30조에 따라 직업능력개발훈련의 직종별 훈련 기준을 다음과 같이 고용노동부 고시 제2023-14호에서 고시하고 있다.

〈직업능력개발훈련의 직종별 훈련기준〉

대분류	중분류	소분류	세분류	비고
19. 전기·전자	01. 전기	01. 발전설비설계	01. 수력발전설비설계	
			02. 화력발전설비설계	
			03. 원자력발전설비설계	
		02. 발전설비운영	01. 수력발전설비운영	
			02. 화력발전설비운영	
			03. 원자력발전설비운영	
			04. 원자력발전전기설비정비	
			05. 원자력발전기계설비정비	
			06. 원자력발전계측제어설비정비	
		03. 송배전 설비	01. 송변전배전설비설계	
			02. 송변전배전설비운영	
			03. 송변전배전설비공사감리	
			04. 직류송배전전력변환설비제작	
			05. 직류송배전제어·보호시스템설비제작	
06. 직류송배전시험평가				
07. 직류송배전전력변환설비설계	추가			
08. 직류송배전제어·보호시스템설비설계	추가			
04. 지능형전력망설비	01. 지능형전력망설비			
	02. 지능형전력망설비소프트웨어			
05. 전기기기제작	01. 전기기기설계			
	02. 전기기기제작			
	03. 전기기기유지보수			
	04. 전기전선제조			
06. 전기설비설계·감리	01. 전기설비설계			
	02. 전기설비감리			
	03. 전기설비운영			
07. 전기공사	01. 내선공사			
	02. 외선공사			
	03. 변전설비공사			
	04. 전기공사관리	추가		
08. 전기자동제어	01. 자동제어시스템설계			
	02. 자동제어기기제작			
	03. 자동제어시스템유지정비			
	04. 자동제어시스템운영			
09. 전기철도	01. 전기철도설계·감리			
	02. 전기철도시공			
	03. 전기철도시설물유지보수			
10. 철도신호제어	01. 철도신호제어설계·감리			
	02. 철도신호제어시공			
	03. 철도신호제어시설물유지보수			
11. 초임계CO2발전	01. 초임계CO2발전열원설계·제작			
	02. 초임계CO2열교환기설계·제작			
	03. 초임계CO2회전기기설계·제작			
12. 전기저장장치	01. 전기저장장치개발			
	02. 전기저장장치설치			
13. 미래형전기시스템	01. 스마트유지보수운영			
14. 전지	01. 리튬이온전지셀제조	추가		

(2) 안전인증·자율안전확인 및 안전검사 고시 현행화

다음 <표 IV-6>과 같이 한국전기설비규정(KEC) 대비 고용부 안전인증·자율안전확인 및 안전검사 고시의 현행화를 검토하였다. 그리고 다음 <표 IV-7>과 같이 한국전기설비규정(KEC)의 주요 항목과 비교를 통해 고용부 고시의 전기안전 분야의 기준과 차이점을 정리하였다.

고용노동부의 안전인증·자율안전확인 및 안전검사 고시와 한국전기설비규정(KEC)과의 주요 차이점은 다음과 같다.

첫 번째 절연저항 항목의 경우 안전인증 및 자율안전확인 고시에서는 절연저항 시험전압을 일괄적으로 적용하고 있으나, 안전검사 기준에서는 대지전압별로 시험전압을 구분하고 있다. 그리고 KEC 규정에서는 500V 인가 시 1M Ω 이상으로 규정하고 있다.

두 번째, 접지저항 항목에서는 400V를 기준으로 접지저항 기준값을 100 Ω 이하, 10 Ω 이하로 각각 제시하고 있으나, KEC 규정에서는 인체 허용접촉 전압이 50V 이하가 되도록 규정하고 있다.

세 번째, 전선 식별의 경우 안전인증 및 자율안전확인 고시에서는 전원선과 접지선만을 별도 색상으로 구분하고 있으며, 안전검사 고시에서는 별도의 규정을 두고 있지 않다. 그리고 KEC에서는 접지선 외 전원선의 색상을 별도로 규정하고 있다.

마지막으로 과전류 보호 항목의 경우 전동기 정격전류에 대한 일정 비율로 일괄적으로 적용하고 있으나, KEC 규정에서는 과전류 차단기의 용량을 케이블의 허용전류와 보호장치의 동작 사양 등에 따른 계산값에 의해 결정하고 있다.


〈표 IV-6〉 한국전기설비규정(KEC) 대비 고용부 고시 현행화 검토(안)

구분	고용부 고시	KEC
절연저항	500V 인가시 1M Ω 이상 ※ 안전검사는 대지전압별 구분	【KEC 132 전로의 절연저항 및 절연내력】 500V 인가시 1M Ω 이상
접지저항	400V 미만 100 Ω 이하 400V 이상 10 Ω 이하	【KEC 142 접지시스템의 시설 및 211 감전에 대한 보호】 허용접촉전압(50V) 이내를 만족하도록 저항값 산정 1) 접지시스템 구분 - 계통접지, 보호접지, 피뢰시스템 접지 2) 접지시스템의 종류 - 단독접지, 공통접지, 통합접지
전선 식별	교류 및 직류 전원선로: 흑색 접지: 녹색 또는 녹색과 황색 조합	【KEC 121.2 전선의 식별】 L1(갈색), L2(흑색), L3(회색), N(청색), 접지(녹색 +노란색)
과전류 보호	과전류 보호용으로 차단기 또는 퓨즈를 설치 시 차단용량은 해당 전동기 등의 정격전류에 대하여 차단기는 250퍼센트, 퓨즈는 300퍼센트 이하	【KEC 212 과전류에 대한 보호】 과전류 차단기의 용량을 케이블의 허용전류와 보호장치의 동작사양 등에 따른 계산값에 의해 결정

〈표 IV-7〉 고용부 고시 및 KEC 항목별 비교

구분	안전인증 고시	자율안전확인신고 고시	안전검사 고시	KEC												
절연저항	<p>전원선과 보호 분당 회로 사이에 직류 전압 500볼트를 인가하여 측정할 절연저항 값은 1메가오姆 이상이어야 한다. 단, 부스바, 칼렉터선, 칼렉터봉 설비 또는 슬립링 조립품 등과 같은 전기장비 일부의 최소 절연저항 값은 보다 낮을 수 있으나 그 값은 50킬로오姆 이상이어야 한다.</p>	<p>전원선과 보호 분당 회로 사이에 직류 전압 500볼트를 인가하여 측정할 절연저항 값은 1메가오姆 이상이어야 한다. 단, 부스바, 칼렉터선, 칼렉터봉 설비 또는 슬립링 조립품 등과 같은 전기장비 일부의 최소 절연저항 값은 보다 낮을 수 있으나 그 값은 50킬로오姆 이상이어야 한다.</p>	<p>배선의 절연저항은 다음과 같을 것 1) 대지전압 150볼트 이하는 0.1메가오姆 이상일 것 2) 대지전압 150볼트 초과 300볼트 이하는 0.2메가오姆 이상일 것 3) 사용전압 300볼트 초과 400볼트 미만은 0.3메가오姆 이상일 것 4) 사용전압 400볼트 이상은 0.4메가오姆 이상일 것</p>	<p>【KEC 132(전로의 절연저항 및 절연내력)】 1. 사용전압이 저압인 전로의 절연성은 기술기준 제52조를 충족하여야 한다. 다만, 저압 전로에서 정전이 어려운 경우 등 절연저항 측정이 곤란한 경우 저항성분의 누설전류가 1mA 이하이면 그 전로의 절연성은 적합한 것으로 본다.</p> <p>【전기설비기술기준 제52조(저압전로의 절연성능)】 전기사용 장소의 사용전압이 저압인 전로의 전선 상호간 및 전로와 대지 사이의 절연저항은 개폐기 또는 과전류차단기로 구분할 수 있는 전로마다 다음 표에서 정한 값 이상이어야 한다. 다만, 전선 상호간의 절연저항은 기계기구를 쉽게 분리할 수 있는 분기회로의 경우 기기 접속 전에 측정할 수 있다. 또한 측정 시 영향을 주거나 손상을 받을 수 있는 SPD 또는 기타 기기 등은 측정 전에 분리시켜야 하고, 부득이하게 분리가 어려운 경우에는 시험전압을 250V DC로 낮추어 측정할 수 있지만 절연저항 값은 1MΩ 이상이어야 한다.</p> <table border="1" data-bbox="1103 294 1209 612"> <thead> <tr> <th>사용전압</th> <th>DC(험전압)V</th> <th>절연저항(MΩ)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>SELV 및 PELV</td> <td>250</td> <td>0.5</td> </tr> <tr> <td>FEL, 500V 이하</td> <td>500</td> <td>1.0</td> </tr> <tr> <td>500V 초과</td> <td>1,000</td> <td>1.0</td> </tr> </tbody> </table>	사용전압	DC(험전압)V	절연저항(M Ω)	SELV 및 PELV	250	0.5	FEL, 500V 이하	500	1.0	500V 초과	1,000	1.0
사용전압	DC(험전압)V	절연저항(M Ω)														
SELV 및 PELV	250	0.5														
FEL, 500V 이하	500	1.0														
500V 초과	1,000	1.0														

〈표 IV-7〉 (계속)

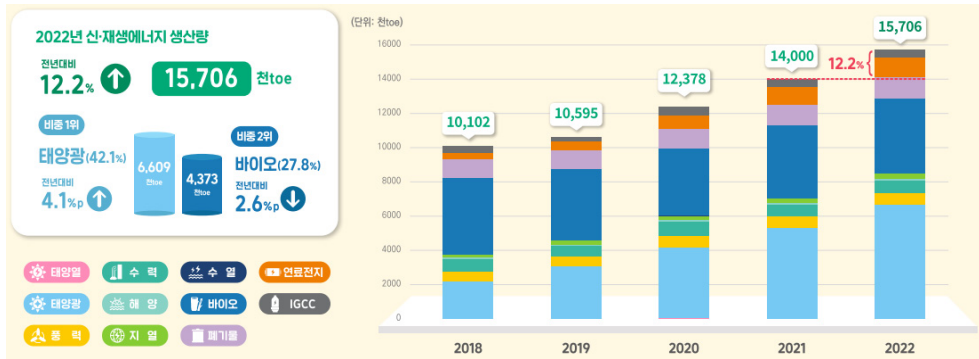
구분	안전인증 고시	자율안전확인신고 고시	안전검사 고시	KEC							
	<p>가. 전기장치 외함접지는 접지단자를 이용하여 설치해야 하며, 다음과 같아야 한다. 다만, 방폭지역의 저압 전기기계·기구의 외함은 전압에 관계없이 10Ω 이하여야 한다.</p> <p>1) 400볼트 미만일 때 100Ω 이하 일 것</p> <p>2) 400볼트 이상일 때는 10Ω 이하 일 것</p> <p>나. 접지선은 충분한 기계적·전기적 강도를 가져야 한다.</p> <p>다. 외함 접지선의 최소 단면적은 〈표 1-4〉에 표시된 것 이상이어야 한다.</p>	<p>가. 전기장치 외함접지는 접지단자를 이용하여 설치해야 하며, 다음과 같아야 한다. 다만, 방폭지역의 저압 전기기계·기구의 외함은 전압에 관계없이 10Ω 이하여야 한다.</p> <p>1) 400볼트 미만일 때 100Ω 이하 일 것</p> <p>2) 400볼트 이상일 때는 10Ω 이하 일 것</p> <p>나. 접지선은 충분한 기계적·전기적 강도를 가져야 한다.</p> <p>다. 외함 접지선의 최소 단면적은 〈표 1-4〉에 표시된 것 이상이어야 한다.</p>	<p>전동기 외함, 제어반의 프레임 등은 접지되고 그 접지저항은 400볼트 미만일 때 100Ω, 400볼트 이상일 때는 10Ω 이하일 것</p>	<p>【KEC 142.1 접지시스템의 구성요소 및 요구사항】</p> <p>142.1.2 접지시스템 요구사항</p> <p>1. 접지시스템은 다음에 적합하여야 한다.</p> <p>가. 전기설비 보호 요구사항을 충족하여야 한다.</p> <p>나. 지락전류와 보호도체 전류를 대지에 전달할 것. 다만, 열적·열·기계적, 전기·기계적 응력 및 이러한 전류로 인한 감전의 위험이 없어야 한다.</p> <p>나. 전기설비의 기능적 요구사항을 충족하여야 한다.</p> <p>2. 접지저항 값은 다음에 의한다.</p> <p>가. 부식, 건조 및 동결 대기환경 변화에 충족하여야 한다.</p> <p>나. 인체 감전보호를 위한 값과 전기설비의 기계적 요구에 의한 값을 만족하여야 한다.</p>							
접지저항	<p>〈표 1-4〉 접지선의 최소 단면적</p> <table border="1" data-bbox="800 526 924 620"> <tr> <td>전원 공급용 전선의 단면적(S(mm²))</td> <td>접지선의 최소 단면적(S(mm²))</td> </tr> <tr> <td>S ≤ 16</td> <td>S</td> </tr> <tr> <td>16 < S ≤ 35</td> <td>16</td> </tr> <tr> <td>S > 35</td> <td>S/2</td> </tr> </table>	전원 공급용 전선의 단면적(S(mm ²))	접지선의 최소 단면적(S(mm ²))	S ≤ 16	S	16 < S ≤ 35	16	S > 35	S/2	<p>라. 외함접지 단자에는 문자(PE)를 표기하여야 하며, 기계부품 등의 본딩회로에 사용되는 그 밖의 단자에는 다음 중 하나의 방법으로 표기하여야 한다.</p> <p>1) 기호로 표현하는 경우: </p> <p>2) 문자로 표기하는 경우: PE</p> <p>3) 녹색 또는 녹색 및 황색 조합 접지선</p>	<p>【KEC 211 감전에 대한 보호】</p> <p>211.2 전원의 자동차단에 의한 보호</p> <p>1. 전원의 자동차단에 의한 보호 대책</p> <p>가. 기본보호는 211.2.2에 따라 충전부의 기본절연 또는 격벽이나 외함에 의한다.</p> <p>나. 고장보호는 211.2.3부터 211.2.7까지에 따른 고장일 경우 보호등전위본딩 및 자동차단에 의한다.</p> <p>다. 추가적인 보호로 누전차단기를 시설할 수 있다.</p>
전원 공급용 전선의 단면적(S(mm ²))	접지선의 최소 단면적(S(mm ²))										
S ≤ 16	S										
16 < S ≤ 35	16										
S > 35	S/2										

〈표 IV-7〉 (계속)

구분	안전인증 고시	자율안전확인신고 고시	안전검사 고시	KEC												
전선식별	<p>전선의 색상은 다음과 같이 한다. 다만, 부품에 부착된 전선 및 다심케이블(녹황색 조합전선은 제외한다.)의 경우 또는 전선에 숫자 및 알파벳 등으로 식별이 가능한 구분표시가 된 경우에는 예외로 한다.</p> <p>1) 흑색-교류 및 직류 전원선로 2) 적색-교류제어회로 3) 황색-직류제어회로 4) 주황색-외부 전원에서 공급되는 연동장치 제어회로 5) 녹색 또는 녹색과 황색 조합-접지 6) 청색-중성선</p>	<p>전선의 색상은 다음과 같이 한다. 다만, 부품에 부착된 전선 및 다심케이블(녹황색 조합전선은 제외한다.)의 경우 또는 전선에 숫자 및 알파벳 등으로 식별이 가능한 구분표시가 된 경우에는 예외로 한다.</p> <p>1) 흑색-교류 및 직류 전원선로 2) 적색-교류제어회로 3) 황색-직류제어회로 4) 주황색-외부 전원에서 공급되는 연동장치 제어회로 5) 녹색 또는 녹색과 황색 조합-접지 6) 청색-중성선</p>	<p>"기준 없음"</p>	<p>【KEC 121.2(전선의 식별)】 1. 전선의 색상은 표121.2-1에 따른다.</p> <p>〈표 121.2-1 전선식별〉</p> <table border="1" data-bbox="487 308 662 606"> <tr> <td>상(문자)</td> <td>색상</td> </tr> <tr> <td>L1</td> <td>갈색</td> </tr> <tr> <td>L2</td> <td>흑색</td> </tr> <tr> <td>L3</td> <td>회색</td> </tr> <tr> <td>N</td> <td>청색</td> </tr> <tr> <td>보호도체</td> <td>녹색-노란색</td> </tr> </table>	상(문자)	색상	L1	갈색	L2	흑색	L3	회색	N	청색	보호도체	녹색-노란색
상(문자)	색상															
L1	갈색															
L2	흑색															
L3	회색															
N	청색															
보호도체	녹색-노란색															
과부하 전류	<p>과전류 보호용으로 차단기 또는 퓨즈 설치 시 차단용량은 해당 전동기 등의 정격전류에 대하여 차단기는 250%, 퓨즈는 300% 이하이어야 한다.</p>	<p>과전류 보호용으로 차단기 또는 퓨즈 설치 시 차단용량은 해당 전동기 등의 정격전류에 대하여 차단기는 250%, 퓨즈는 300% 이하이어야 한다.</p>	<p>과전류 보호용으로 차단기 또는 퓨즈 설치 시 차단용량은 해당 전동기 등의 정격전류에 대하여 차단기는 250%, 퓨즈는 300% 이하이어야 한다.</p>	<p>【KEC 212.4.1(과부하전류에 대한 보호)】 과부하에 대해 케이블(전선)을 보호하는 장치의 동작특성은 다음의 조건을 충족해야 한다. $IB \leq I_n \leq I_z, I_2 \leq 1.45 \times I_z$ IB : 회로의 설계전류, I_z : 케이블의 허용전류, I_n : 보호장치의 정격전류 I₂ : 보호장치가 규약시간 이내에 유효하게 동작하는 것을 보장하는 전류</p> <p>【KEC 212.4.2(과부하 보호장치의 설치 위치)】 1. 과부하 보호장치는 전로 중 도체의 단면적, 특성, 설치방법 구성의 변경으로 도체의 허용 전류값이 분기점에 설치해야 한다.</p>												

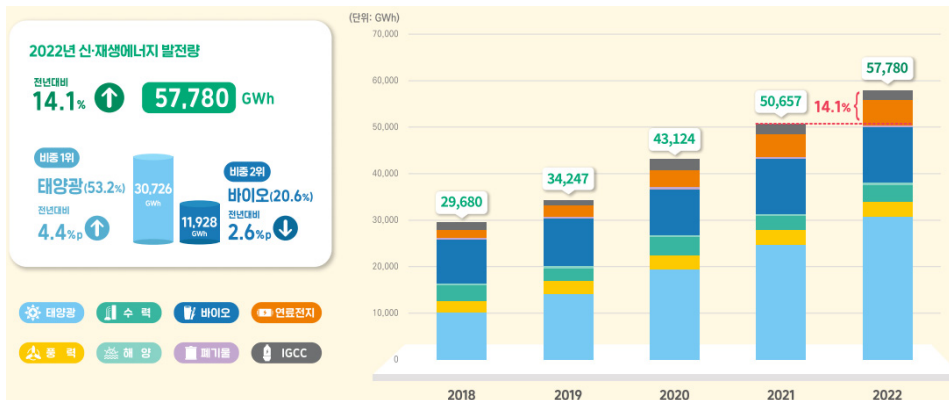
3) 신재생에너지원 보급·사용 확대

산업통상자원부와 한국에너지공단이 발간하는 2022년 신재생에너지 산업 통계에 따르면 다음 [그림 IV-1]와 [그림 IV-2]는 우리나라의 신재생에너지원별 생산량과 발전량을 각각 나타내고 있다. 생산량은 전년 대비 12.2% 증가하였으며 태양광이 전년 대비 4.1%p 증가하여 가장 높은 비중을 차지하였다. 그리고 발전량은 전년 대비 14.1% 증가하였으며 태양광이 전년 대비 4.3%p 증가하여 가장 높은 비중을 차지하였다.



※ 출처: 2022년 신재생에너지 산업통계(한국에너지공단)

[그림 IV-1] 2022년 국내 신재생에너지 생산량



※ 출처: 2022년 신재생에너지 산업통계(한국에너지공단)

[그림 IV-2] 2022년 국내 신재생에너지 발전량

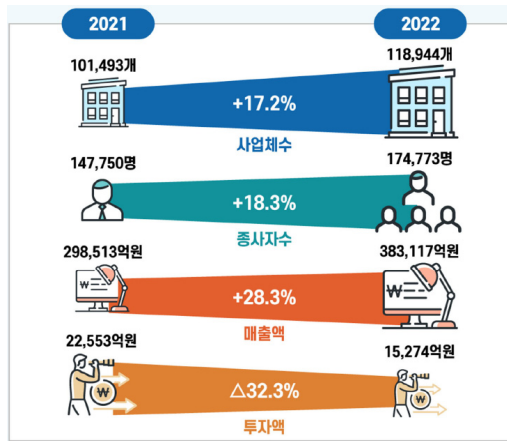
다음 [그림 IV-3]은 우리나라의 신재생에너지원별 보급 용량을 나타내고 있으며, 태양광과 풍력의 설비용량은 2021년 대비 각각 15.0%, 13.9% 증가하여 2022년 기준 24.4GW, 1.9GW를 기록하였다.



※ 출처: 2022년 신재생에너지 산업통계(한국에너지공단)

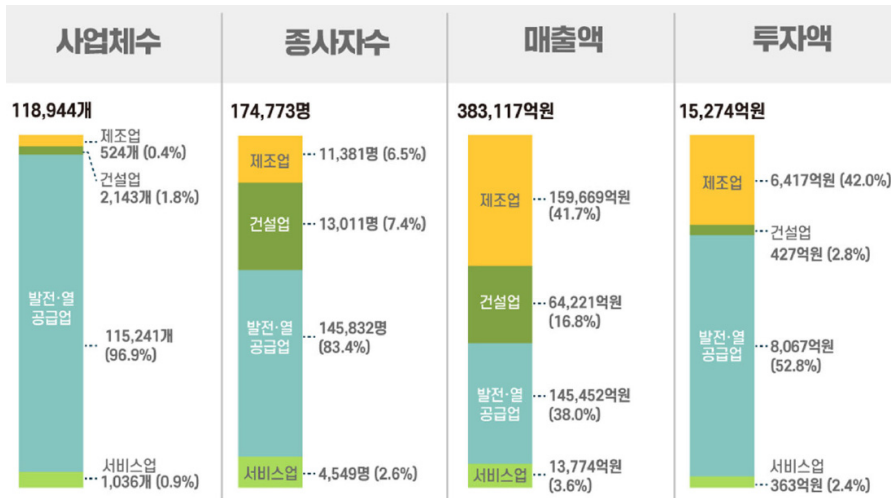
[그림 IV-3] 2022년 국내 신재생에너지 보급 용량

따라서 [그림 IV-4] 및 [그림 IV-5]와 같이 신재생에너지 생산발전 및 보급량 증가에 따라 우리나라의 산업구조도 변화되고 있다. 신재생에너지 증가에 따른 산업구조 변화에 따라 전·후방 산업에 대해서도 재해예방 영역을 설정하고 관리할 필요가 있다.



※ 출처: 2022년 신재생에너지 산업통계(한국에너지공단)

[그림 IV-4] 2022년 국내 신재생에너지 산업 현황



※ 출처: 2022년 신재생에너지 산업통계(한국에너지공단)

[그림 IV-5] 2022년 국내 신재생에너지 산업 업종별 현황

싱크탱크 멤버 글로벌 전력 평가 보고서에 따르면 재생에너지가 2023년 전 글로벌 전력 중에서 차지한 비율이 30.3%로, 이는 2022년 29.4%에서 증가한 수치로, 재생에너지원에는 풍력, 태양광, 수력 및 바이오에너지가 포함되었지만 주로 태양광에 의해 주도된 것으로 파악되고 있다. 여기서 멤버는 “2023년 태양광 발전 용량의 증가가 2030년까지 재생에너지 목표 달성에 높은 가능성을 보이고 있으며, COP28에서 약속한 목표치보다 3배 증가한 수치”라고 언급하고 있다.

앞서 언급한 신재생에너지원 확대에 따른 전기에너지 패러다임도 변화할 것이며, 그에 따라 산업안전 패러다임도 변화되어야 한다. 그러나 기술과 법·제도의 공백 현상으로 사각지대가 발생하고 있으며, 이러한 사각지대는 향후 더 확대될 것으로 예측할 수 있다.

현재 산업안전보건기준에 관한 규칙의 제3절 전기작업에 대한 위험 방지의 안전조치 내용을 직류와 교류 구분은 없으나, 일부 조항의 경우 직류감전 및 전기화재에 대한 안전조치 내용이 부재하거나 국내·외 기술 표준(IEC, KS, KEC 등) 등과 부합되지 않는 내용으로 인해 법·제도와 기술과의 공백 현상으로 사각지대가 발생하고 있다.

특히 직류 배전 및 전기자동차 등 직류전원 산업군에 대한 안전조치 사항이 명확하지 않아 감전 및 전기화재 등 전기사고 예방을 위한 관리주체가 불명확하고 산업군의 생애주기별 연계 구간에서의 책임소재도 불분명할 수 있다. 예를 들면 전기자동차의 배터리로 인한 감전 시 전기자동차를 전기기계·기구 및 설비로 볼 수 있는지, 또한 배터리를 전기기계·기구 및 설비로 판단 여부 또는 충전부로 판단에 대한 법적 근거도 불분명하다.

신재생에너지원의 생애주기별 전·후방 산업군에 대한 지원도 필요하다. 예를 들면, 풍력발전기 제조, 이송, 설치 및 유지보수 등 산업군별 연계 구간에 대한 명확화가 필요하고 생애주기별 안전조치 사항에 대한 구체화도 필요하다.

2. 법·기준 개선사항

1) 산업안전보건법

가) 산업안전보건기준에 관한 규칙 제321조제1항제7,8호

교류와 직류를 구분하여 충전전로의 선간전압별 접근한계영역을 다음 <표 IV-8>와 <표 IV-9>와 같이 각각 제시하였다.

<표 IV-8> 교류 시스템의 노출 충전부 접근한계영역

공칭전압 (선간전압 ⁸⁾)	접근한계영역 ⁹⁾		
	노출 이동형 도체 ¹⁰⁾	노출 고정형 회로	접근제한영역 ²³⁾ ; 의도하지 않은 이동이 발생하는 경우(가산)
50 V 미만	접촉금지	접촉금지	비적용
50 V ~ 150 V ¹¹⁾	3.0 m	1.0 m	접촉금지
151 V ~ 750 V	3.0 m	1.0 m	0.3 m
751 V ~ 15 kV	3.0 m	1.5 m	0.7 m
15.1 kV ~ 36 kV	3.0 m	1.8 m	0.8 m
36.1 kV ~ 46 kV	3.0 m	2.5 m	0.8 m
46.1 kV ~ 72.5 kV	3.0 m	2.5 m	1.0 m
72.6 kV ~ 121 kV	3.0 m	2.5 m	1.0 m
138 kV ~ 145 kV	3.4 m	3.0 m	1.2 m
161 kV ~ 169 kV	3.6 m	3.6 m	1.3 m
230 kV ~ 242 kV	4.0 m	4.0 m	1.7 m
345 kV ~ 362 kV	4.7 m	4.7 m	2.8 m
500 kV ~ 550 kV	5.8 m	5.8 m	3.6 m
765 kV ~ 800 kV	7.2 m	7.2 m	4.9 m

8) 250V 이상의 단상 시스템에서는 시스템의 최대 선간전압에 1.732를 곱한 것과 동일한 범위를 선택한다.

9) 감전 위험성평가를 고려하여 유자격자와 유자격자가 아닌 근로자의 안전접근거리 구분

10) 노출된 이동형 도체는 도체와 사람 사이의 거리가 사람의 통제를 받지 않는 상태를 나타

〈표 IV-9〉 직류 시스템의 노출 충전부 접근한계영역

공칭전압 (선간전압)	접근한계영역		
	노출 이동형 도체 ¹²⁾	노출 고정형 회로	접근제한영역; 의도하지 않은 이동이 발생하는 경우(가산)
50 V 미만	접촉금지	접촉금지	비적용
50 V ~ 300 V	3.0 m	1.0 m	접촉금지
301 V ~ 1 kV	3.0 m	1.5 m	0.7 m
1.1 kV ~ 5 kV	3.0 m	1.8 m	0.8 m
5 kV ~ 15 kV	3.0 m	2.5 m	0.8 m
15.1 kV ~ 45 kV	3.0 m	2.5 m	1.0 m
45.1 kV ~ 75 kV	3.0 m	2.5 m	1.0 m
75.1 kV ~ 150 kV	3.4 m	3.0 m	1.2 m
150.1 kV ~ 250 kV	3.6 m	3.6 m	1.3 m
250.1 kV ~ 500 kV	4.0 m	4.0 m	1.7 m
500.1 kV ~ 800 kV	4.7 m	4.7 m	2.8 m

원칙적으로는 유자격자가 아닌 근로자는 충전부에 대한 접근한계거리보다 가까이 접근을 금지한다.

- 만약, 한 명 이상의 유자격자가 아닌 근로자가 접근한계거리에 인접해서 작업하는 경우 유자격자가 아닌 근로자에게 전기 위험성에 대하여 주지시키고 유자격자가 아닌 근로자가 접근한계거리 외부에서 작업할 수 있도록 경고 수단이 적용되어야 한다.
- 유자격자가 아닌 근로자가 접근한계거리 이내에서 작업해야 할 필요성이 있는 경우 유자격자인 근로자는 유자격자가 아닌 근로자가 접근한계거리 이내에서 작업하는 동안에는 전기 위험성을 포함한 발생할 수 있는 모든

내며, 일반적으로 전주로 지지되는 가공선 도체에 적용된다.
 11) 이 구간에는 120V를 초과하지 않는 노출된 회로가 포함된다.
 12) 노출된 이동형 도체는 도체와 사람 사이의 거리가 사람의 통제를 받지 않는 상태를 나타내며, 일반적으로 전주로 지지되는 가공선 도체에 적용된다.

위험성에 대하여 주지시키고 지속적으로 관리·감독하여야 한다. 어떠한 경우라도 유자격자가 아닌 근로자는 접근한계영역 이내에서 접근제한영역 이내로 진입하여서는 안 된다.

- 유자격자가 충전전로 인근에서 작업하는 경우 다음의 사항을 제외하고는 노출된 충전 도체 또는 회로 부품에 대하여 표에서 명시된 거리 이내에서는 도전체를 취급·사용할 수 없다.
 - 유자격자가 50볼트 이상의 충전된 도체 또는 회로·부품으로부터 절연되거나 방호되는 경우
 - 전기작업 수행 시 충전부에 대한 절연 수단으로 절연장갑과 절연소매를 착용한 경우
 - 전기적으로 충전된 도체 또는 회로부품이 유자격자 또는 노출 충전부가 다른 전위를 갖는 도전체 또는 근로자와 절연된 경우
 - 유자격자가 다른 전위를 갖는 충전된 도체 또는 회로·부품으로부터 절연된 경우

2) 안전인증·안전검사·자율안전확인 고시

다음 <표 IV-10>과 같이 고용부 안전인증·자율안전확인 및 안전검사 고시의 현행화를 검토하였다. 이를 위해 한국전기설비규정(KEC)의 주요 항목과 비교를 통해 고용부 고시의 전기안전 관련 기준의 차이점을 정리하였다.

주요 내용으로는 절연저항 항목은 전기설비기술의 해당 항목을, 접지저항 및 과전류 보호 항목은 한국전기설비규정(KEC) 해당 항목을 각각 준용한다. 또한 전선 식별 항목은 기존 고시 내용에서 접지선 색상을 녹색과 노란색의 조합으로 변경한다.

〈표 IV-10〉 고용부 고시 현행화 검토

구분	검토 내용
절연저항	전기설비기술기준 제52조(저압전로의 절연성능)기준에 적합하여야 한다.
접지저항	한국전기설비규정(KEC) 142항 접지시스템의 시설 및 211항 감전에 대한 보호의 내용에 적합하여야 한다. ※ KEC 적용시점(21.1.1) 이전에 설치된 기존 공장의 전기시스템을 활용하여 설치되는 위험기계·기구의 경우 현행 접지저항 고시 내용을 적용
전선 식별	다. 전선의 색상은 다음과 같이 한다. 다만, 부품에 부착된 전선 및 다심케이블(녹황색 조합전선은 제외한다.)의 경우 또는 전선에 숫자 및 알파벳 등으로 식별이 가능한 구분표시가 된 경우에는 예외로 한다. 1) 흑색-교류 및 직류전원선로 2) 적색-교류제어회로 3) 청색-직류제어회로 4) 주황색-외부 전원에서 공급되는 연동장치 제어회로 5) 녹색과 노란색 조합-접지선 6) 청색-중성선
과전류 보호	한국전기설비규정(KEC) 212.4 과부하전류에 대한 보호의 내용에 적합하여야 한다.

3. 전기안전 신기술 개발

1) 지락차단장치(RCD)

(1) 배경 및 필요성

가) 전기에너지 사용환경 변화

정부는 「2050 탄소중립 녹색성장 추진전략」에 따라 원전·신재생에너지 등 무탄소 전원 확대를 통해 온실가스 감축을 추진 중이며, 풍력, 태양광, 연료전지 및 ESS 등의 직류 전원설비의 설치·사용이 급증하고 있다. 또한, 산업현장 기계·설비 전동기의 효율적 제어를 위해 교류를 직류로, 직류를 다시 교류로 변환

하거나 고주파 교류 전원을 사용하고 있으며, 태양광 시스템에서 직류 누전이 발생하거나 기계·설비의 전원 변환장치에서 직류·교류 및 맥류 등 복합성분의 누전이 발생하면 기존 누전차단기(ELB)로는 감전 보호가 불가능하다.

나) 신재생에너지 관련 화재사고

- 소방 출동기준 화재사고 통계로, 다음 <표 IV-11>과 같이 연평균 63건의 화재가 태양광 발전설비에서 발생하고 있다.

<표 IV-11> 태양광 발전설비 화재사고

년도	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020.8
건수	44	63	79	45	96	76	45

- '17.8월 고창 실증실험 센터 ESS 화재사고 발생 이후 다음 <표 IV-12>와 같이 '23.9월까지 47건의 화재사고가 발생하였음

<표 IV-12> 에너지저장장치(ESS) 화재사고

년도	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023.8
건수	1	16	11	2	2	8	7

(2) 개선 필요사항

가) 하이브리드 전원용 지락차단장치 개발

- 태양광 발전설비, 전기자동차 충전소 전기저장장치(ESS), LED, 가전기기(SMPS) 및 가변속도 드라이브(VSD) 등의 누설전류는 교류, 직류 및 맥류 등 복합성분으로 구성된다.
- 미래 전기설비 변화에 따라 하이브리드 전원용 능동형 지락차단장치(RCD)의 개발이 필요하며, 개발 지락차단장치는 지락전류 감지센서, 신호처리장치,

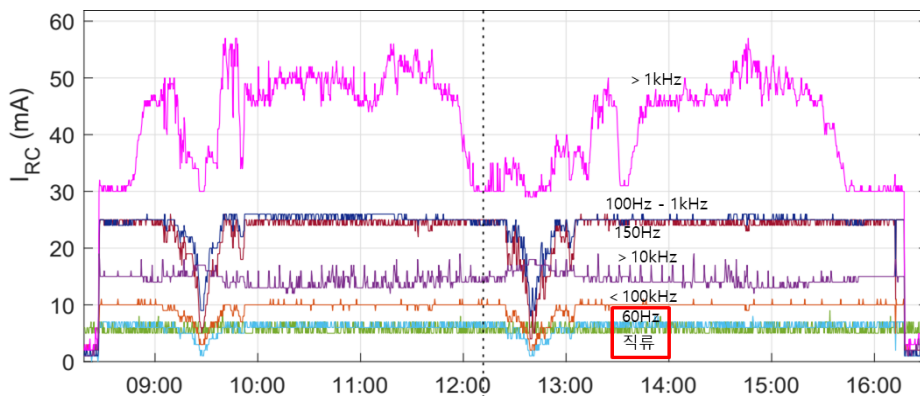
차단장치 및 모니터링 장치를 일체화하여 차단기 외함에 내장한다.

- 이때, 전기설비의 누설전류를 모니터링 및 분석하여, 실제 이상전류를 구분하여 선택적·능동적으로 차단할 수 있는 지락차단장치의 성능구현이 중요하다.

나) 기존 지락차단장치의 동작 신뢰성 확보

① 정상운전 상태에서의 누설전류 통제

- 태양광 발전설비의 정격은 750V, 9A, 4.8kW이며 다음 [그림 IV-6]과 같이 태양광 발전설비 운영 중에 누설전류를 측정해 본 것으로, 직류 및 교류(60Hz) 성분의 누설전류는 5~6mA로 정상상태를 나타내고 있다.
- 그러나, 1kHz 초과 고주파 누설전류는 30~55mA, 100Hz~1kHz와 150Hz 누설전류는 25mA로 정상운전 상태에서도 고주파 누설전류가 매우 높다.
- 이때, IGBT¹³⁾ 스위칭 전류와 계통의 기생 커패시턴스 및 고주파 누설 전류가 합성되어 흐르기 때문에 지락차단장치는 불필요한 동작을 한다.

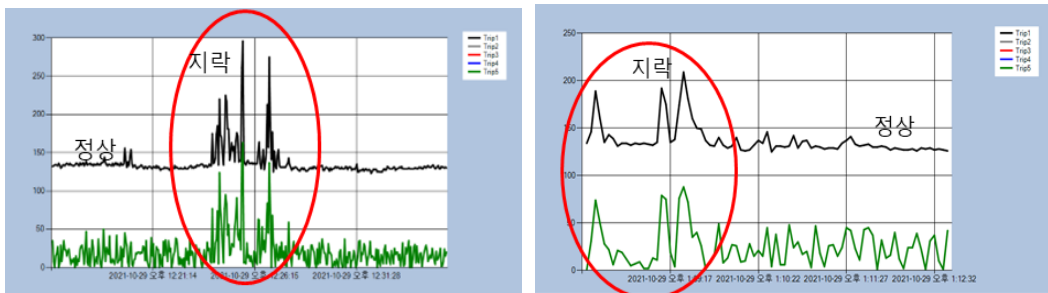


[그림 IV-6] 정상운전 상태에서의 누설전류 측정값

13) 절연 게이트 바이폴라 트랜지스터(Insulated Gate Bipolar Transistor)로 높은 입력 임피던스, 고속 스위칭, 고전압에서 낮은 저항값을 가지는 기본적인 특성이 있음

② 지락사고 발생시 누설전류 성분 분석

- 다음 [그림 IV-7]은 실제 지락사고 발생시 누설전류 측정값을 나타내고 있다.
- 정상운전 시에도 누설전류가 최대 95mA까지 측정되며, 지락사고 시에는 최대 300mA까지 증가한다.
- 녹색 그래프는 직류 및 교류(60Hz) 성분의 전류를 나타내며, 검정색 그래프는 직류, 교류(60Hz) 및 고주파 성분을 포함한 합성전류 값이다.
- 정상운전 또는 지락사고 발생 시 누설전류 성분을 저주파와 고주파로 구분하는 것이 누설전류의 노이즈 성분 분석에 중요함을 그림에서 확인하였다.
- 계통 전체의 누설전류 분석을 통해 기계·설비의 부식 대응, 누설전류 크기에 따른 대지전압 상승 등의 원인 규명을 할 수 있다. 또한, 저주파 또는 직류 성분의 누설전류에 대하여 실제 지락사고 여부를 판단할 수 있는 근거로 활용할 수 있다.



[그림 IV-7] 지락사고 발생 시 누설전류 측정값

③ 태양광 발전설비의 지락전류 선별적 대응

- 기존 누전차단기(ELB)는 고주파 누설전류의 보호 또는 대응에 한계가 있어, 급변 또는 완만한 지락전류로 구분 관리가 필요하다.
- 지락전류가 다음 <표 IV-13>과 같이 급격히 변하는 경우 제한 시간 이내에 동작하여야 한다.

- 이때 전력변환장치 용량이 30kVA 이하의 경우 지락전류 300mA이하에서는 300ms이내에 동작하고, 30kVA 초과인 경우 kVA당 10mA를 가산한다.

〈표 IV-13〉 지락전류의 급격한 변화에 따른 지락차단장치 동작시간

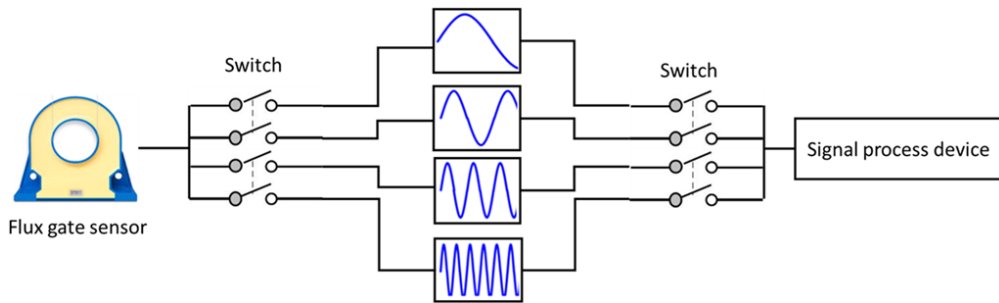
지락전류의 급격한 변화	동작시간
$\Delta I_g = 30\text{mA/sec}$	< 300ms
$\Delta I_g = 60\text{mA/sec}$	< 150ms
$\Delta I_g = 150\text{mA/sec}$	< 40ms

- 태양광 발전설비의 지락전류 분석을 통해 다음과 같이 구분·관리한다.
 - 직류 및 교류(60Hz) 성분의 지락전류는 급격하게 변하는 지락전류 및 차단시간 기준을 적용함
 - 고주파 성분이 포함된 전체 지락전류는 완만하게 변하는 지락전류 및 차단시간 기준을 적용함
 - 따라서, 노이즈에 오동작하거나 불필요한 동작을 최소화하면서 직류 및 교류성분의 지락전류를 효과적으로 통제할 수 있음

(3) 기술 개요

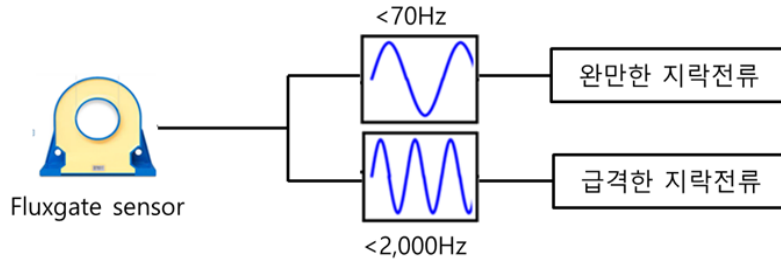
가) 구성 및 작동원리

- ① 직류만 통과시키는 필터, 50/60Hz 이하만 통과시키는 필터, 20kHz 이하만 통과시키는 필터, 제3고조파전류(50 또는 180Hz 전류) 등 영상 고조파 전류를 억제하는 노치필터 등 다양한 필터를 다음 [그림 IV-8]과 같이 복수 이상으로 구성한다. 따라서 실제 지락사고 발생 시 지락전류(잔류전류)에는 정상적으로 동작하고 노이즈 전류는 필터를 통해 제거하여 불필요한 동작을 방지할 수 있다.



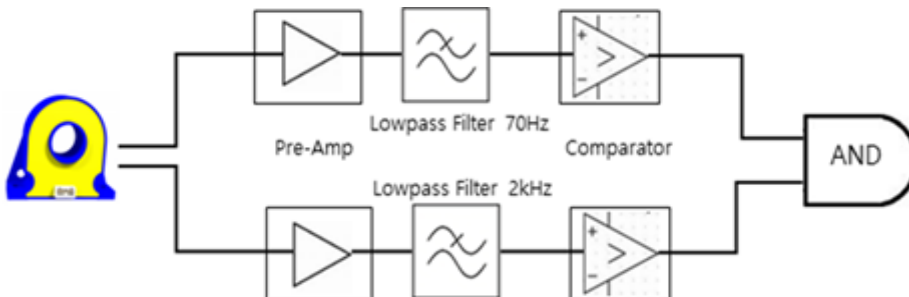
[그림 IV-8] 다양한 필터로 구성되는 지락차단장치(RCD) 블럭도

- ② 그림의 필터는 아날로그 필터 또는 디지털 필터로 구성한다. 또한, 자동으로 원격·조정하여 회로를 구성할 수 있으며, 하이패스(High-Pass), 로패스(Low-Pass), 밴드패스(Band-Pass) 및 노치필터(Notch-Filter)의 조합으로 구성한다.
- ③ 하나의 주파수 대역은 다음 그림과 같이 0(직류)~70Hz로, 급변하는 전류 설정값에 다음과 같이 동작한다.
 - 150mA의 급변하는 전류는 0.04s 이내에 차단 되어야 하므로 짧은 시간에 정확하게 차단
 - 30mA의 급변하는 전류는 고주파의 경우 노이즈 성분이 많이 함유되어 있어 불필요한 차단을 방지하기 위해 0.3s 이내에 차단
- ④ 다른 한 개의 필터 주파수 대역은 다음 [그림 IV-9]와 같이 0 Hz(직류)~2 kHz로 하여 Type B형의 완만한 지락전류 설정값에 동작한다.
 - 지락차단장치의 완만한 동작 특성을 가지기 위해 전체 지락전류의 실효값에서 동작



[그림 IV-9] 필터제어를 통한 완만한/급격한 지락전류에 따른 동작

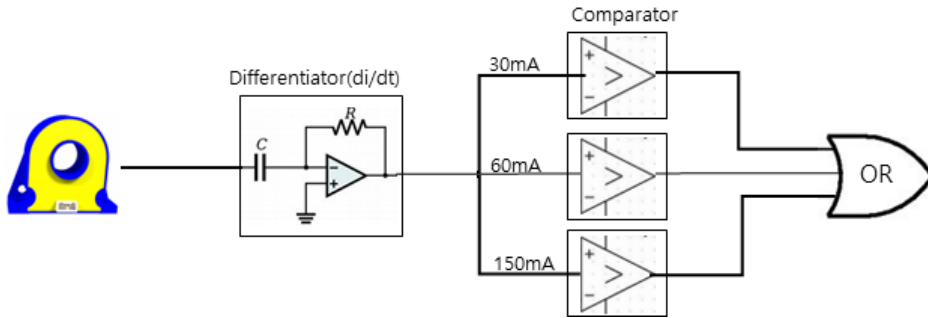
- ⑤ 일부 필터는 70Hz 이상의 하이패스 대역으로 하여 고주파 전류 성분만 분석하여 동작한다.
- ⑥ 지락전류는 지락 지점의 위치에 따라서 직류성분, 50/60Hz 교류 기본파 성분 및 고주파 성분으로 구성된다.
 - 완만한 지락전류는 다음 [그림 IV-10]과 같이 2kHz 이하의 전류 실효값이 설정값 이상이고 또한 60Hz 이하의 전류가 일정 이상 함유되어 있으면 지락으로 판단
 - 완만한 지락전류 설정값은 전력변환장치 용량이 30kVA 이하의 경우 지락전류 300mA이하에서는 300mS이내에 동작하고, 30kVA 초과인 경우 kVA당 10mA를 가산



[그림 IV-10] 완만한 지락전류 검출 회로

⑦ 급격한 지락전류는 다음 [그림 IV-11]과 같이 미분회로를 통해 급격히 증가하는 전류성분을 검출한다.

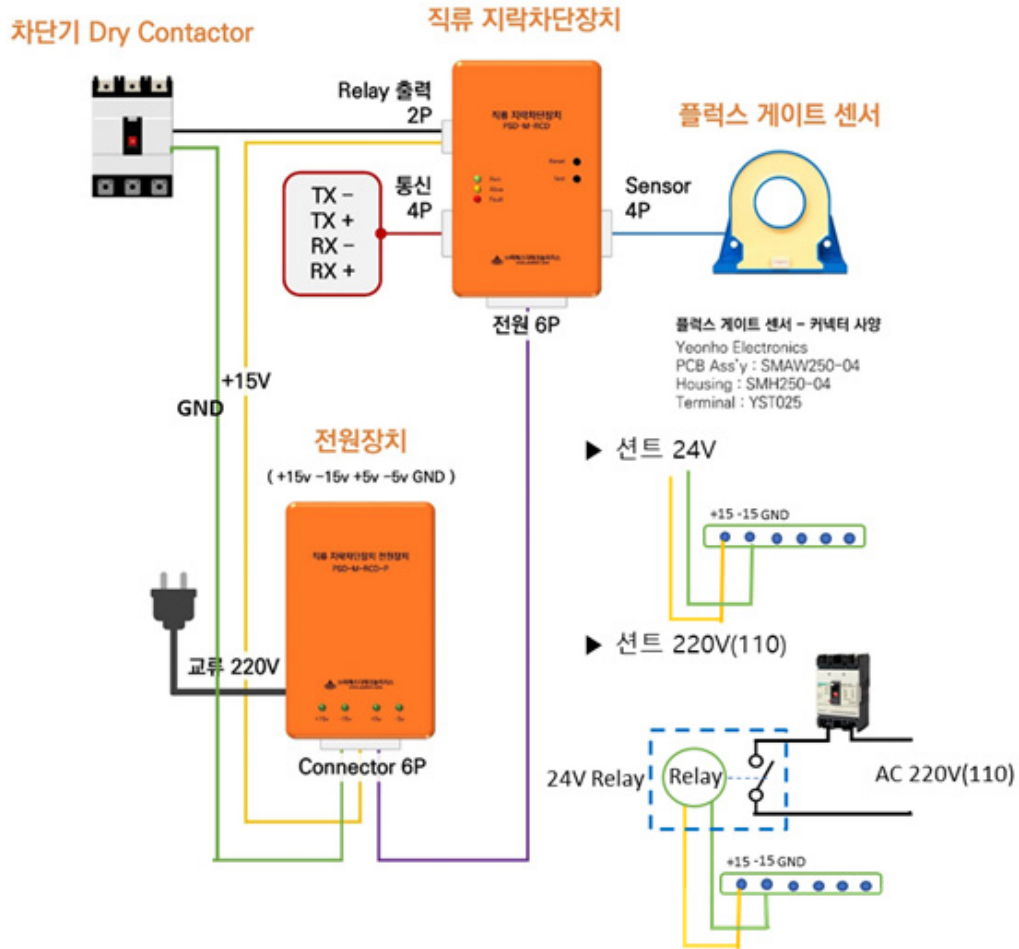
- 30mA, 60mA, 150mA 각각 증가율에 따른 설정시간 이상 시 동작



[그림 IV-11] 급격한 지락전류 검출 회로

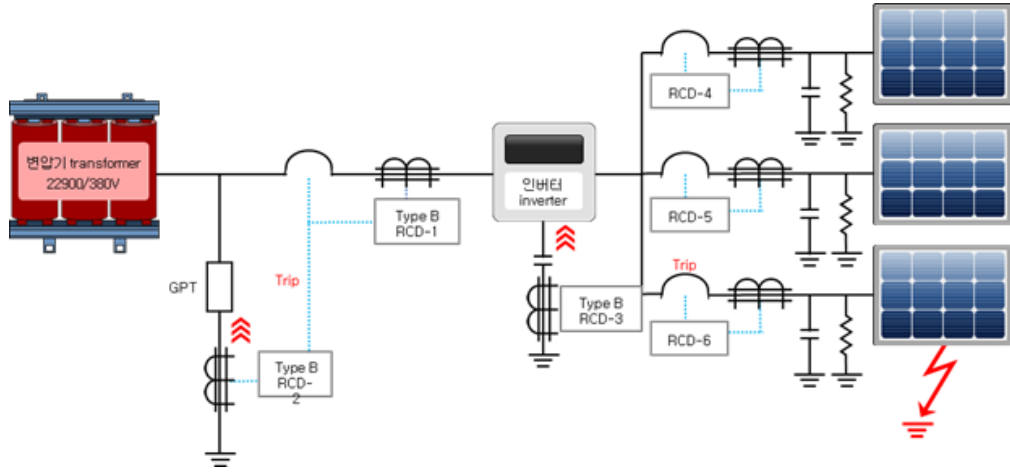
나) 구성 및 설치도

다음 [그림 IV-12]는 직류 지락차단장치 트립회로 구성도로 플럭스 게이트 센서, 신호처리 및 트립장치가 별도로 구성되고 통신 시스템으로 연결되어 있어 지락사고 발생 시 규정된 시간에 차단 책무를 완성할 수 있도록 설계되었습니다.



[그림 IV-12] 직류 지락차단장치 트립회로 구성도

다음 [그림 IV-13]은 태양광 발전설비의 지락차단장치 설치 사례로 인버터 교류측, GPT 접지선 및 직류, 접속함 등에 설치한다. 동작 특성으로는 직류측에서는 순간 동작하고, 교류측에서는 시간 지연 동작한다.



[그림 IV-13] 태양광 발전설비의 지락차단장치 설치 사례

다) 효과

산업현장의 기계·설비에서 발생하는 교류, 직류 또는 맥류 성분의 누설전류를 효과적·능동적으로 통제함으로써 태양광, 에너지저장장치(ESS), 전기자동차 충전설비 및 SMPS 내장 기계·설비 등 직류전원 취급·사용에 따른 감전사고를 예방하고, 태양광 발전설비의 직류회로에서의 이중 지락 발생 시 병렬아크에 의한 화재사고도 예방할 수 있다. 또한 기존 누전차단기(ELB)를 지락차단장치(RCD)로 대체함으로써 노이즈 등에 의한 누전차단기(ELB)의 불필요한 동작으로 발생하는 생산 중단 또는 기계·설비 정지에 따른 유지보수 작업을 최소화하여 끼임 등의 중대재해를 예방하고, 공정 운영 및 설비 운전의 신뢰성 확보를 통한 생산 시스템의 효율적 운영·관리로 경제적 효과 창출도 가능하다.

2) 직류 아크검출장치

(1) 배경 및 필요성

가) 규정 및 근거

- KEC 214.2.1 전기기기에 의한 화재 방지 및 522.3.2 과전류 및 지락 보호장치 관련 산업안전보건법에서는 별도의 규정이 없음
- 한편, 한국전기설비규정 522.3.2 과전류, 지락 및 아크보호장치 제3항에서는 옥상·지붕·벽면 등에 시설하는 태양광 발전설비의 직류 전로에는 아크발생 시 아크를 검출하여 차단하는 장치를 시설하여야 하며, 그 방법 및 성능은 IEC 630027에 따른다고 규정하고 있음
- 또한 교류 전력망의 장기간 운영으로 전기화재 사고예방을 위한 다양한 안전대책 및 안전기술이 산업현장에 적용 중으로,
- 직류 전력망 및 부하 확대 운영이 예상되기 때문에 산업현장에서 교류보다 위험성이 더 큰 직류 아크로 인한 전기화재 사고예방 기술수단 필요

나) 직류전원 시스템에서 아크 발생 시 검출 및 차단 등 보호수단 부재

- 단일 전기적 변수만을 활용하는 기존 검출방식은 아크고장의 특징적인 신호와 외부 노이즈 또는 시스템 외란에 대한 명확한 구분이 불가능함
- 따라서 오검출 또는 미검출의 문제가 빈번히 발생하고 있어 기존 아크 검출장치의 신뢰성 문제가 대두되고 있음
- 특히, 태양광 발전 시스템은 일사량, 온도, 부하 변동 등 다양한 환경적 요인에 따라 전기적 특성이 수시로 변화됨에도 불구하고,
- 실제 아크고장 신호를 정상상태로 간주하거나 아니면 반대로 정상상태의 신호를 아크고장 상태로 간주하는 경우가 다수 발생하고 있음
- 이는 직류전원 시스템에서 아크고장 검출 시스템의 신뢰성을 저하시키고, 불필요한 발전정지 또는 유지보수 비용을 증가시키는 요인으로 작용함

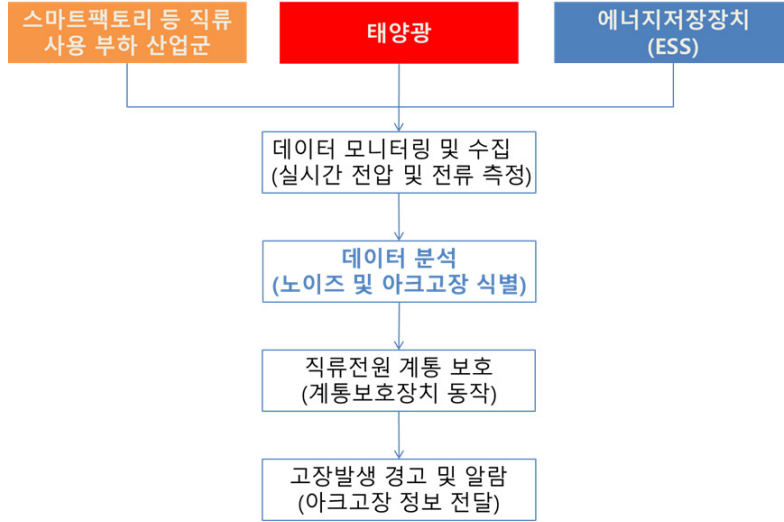
다) 문제점 및 이슈 정리

- 태양광(PV) 발전 시스템 및 에너지저장장치(ESS) 등 직류계통에서의 화재사고의 상당수는 직류아크 전류로 인해 발생하고 있으나 이에 대한 보호 수단 마련 연구는 부재한 상황임
- 예를 들어 태양광 발전 시스템의 직류전로의 (-)에서 1선 지락이 발생하여 지속되면 (+)에서도 지락사고 발생할 수 있음
- 이때, (+)와(-)의 양극에서 지락이 발생하면 단락으로 인해 병렬아크가 발생하고 화재사고로 이어짐
- 참고로 직류전류의 병렬아크는 일종의 플라즈마 방전¹⁴⁾으로 화재사고 발생 시 온도가 19,400℃까지 상승하게 되고, 대형 화재사고로 이어짐

(2) 구성 및 작동원리

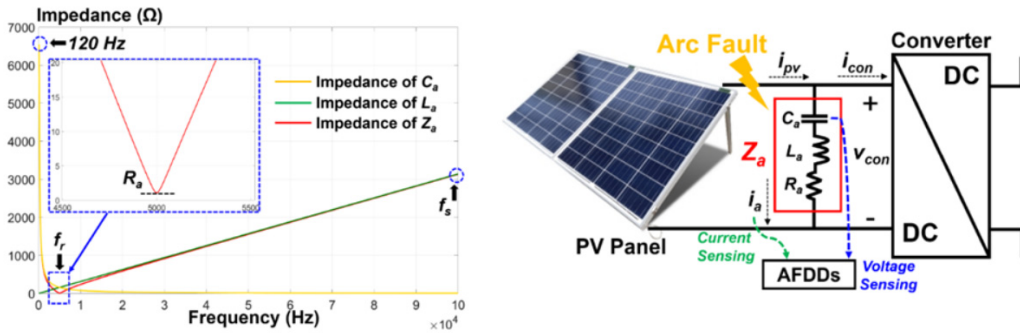
- ① 태양광 및 에너지저장장치 등을 포함한 직류전원 사용·취급 산업군의 아크검출에 관한 기술 및 방법에 관한 기술로, 본 기술은 태양광 및 에너지저장장치 등 직류전원 시스템의 멀티 임피던스 조합을 이용한 아크고장 검출 장치 및 방법에 관한 것이다. 즉 다중 임피던스 정보를 활용함으로써 보다 정확·신속하게 아크고장 검출이 가능하다는 차별성이 있다. 따라서 본 기술에서는 다중 임피던스 데이터를 활용한 고감도, 고정밀의 아크고장 검출 장치 및 방법을 제안하였다. 다음 [그림 IV-14]는 직류(DC) 전원 사용 산업군에서의 전기화재 사고 예방을 위한 아크검출 개념도를 나타내고 있다.

14) 기체상태에서 열이 가해지면, 이온핵과 유전자로 구성된 입자들의 집합체가 형성되는데 기체(전기가 거의 통하지 않는 절연체)가 이러한 전기장 속에 있을 때, 절연성이 상실되면 그 기체를 통해 전류가 흐르는 현상



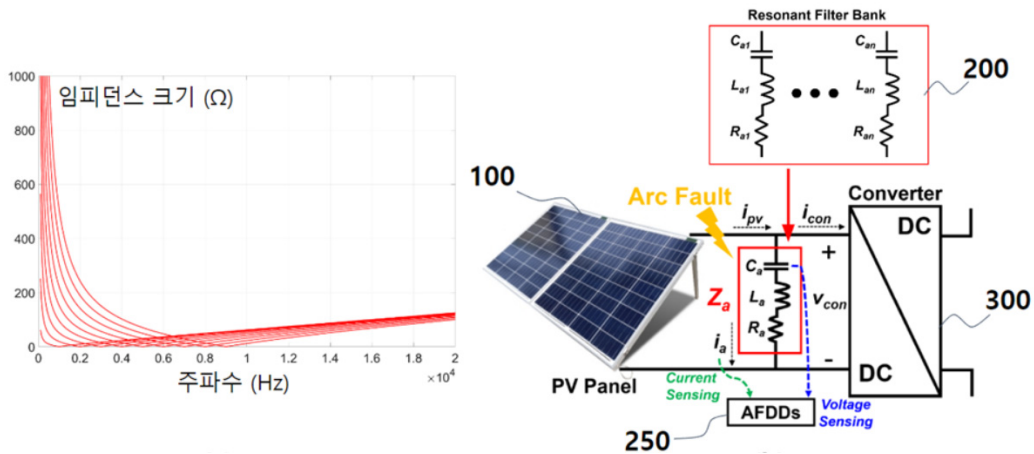
[그림 IV-14] DC 산업군에서의 직류아크 검출 개념도

② 본 기술은 종래 태양광 및 직류전원 시스템에서 사용되는 아크고장 검출 정도의 한계를 극복하기 위한 것으로, 기존의 단일 임피던스 정보만을 활용하던 방식과 달리 다음 [그림 IV-15]와 같이 다중 임피던스 정보를 활용함으로써 정확성과 신뢰성이 높은 아크고장 검출 장치 및 방법을 제안하는 것을 목적으로 한다. 또한, 다양한 주파수 대역에서의 임피던스 변화를 종합적으로 분석하여 아크고장 특성을 추출함으로써 외란이나 노이즈(Noise)에 내성이 강한 고장검출 성능을 제공할 수 있다.



[그림 IV-15] 태양광 발전설비의 직류아크 검출장치 임피던스 적용 사례

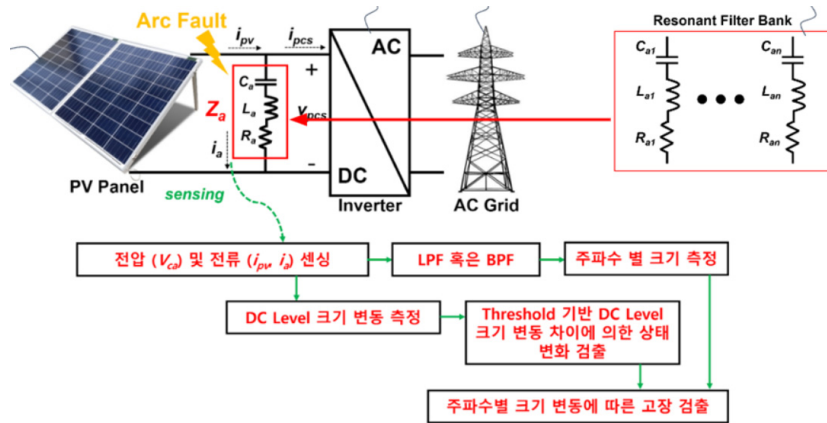
- ③ 태양광 및 직류전원 시스템의 멀티 임피던스 조합을 이용한 아크고장 검출장치는 다음 [그림 IV-16]과 같이 구성된다. 먼저, 태양광 패널 시스템의 전압 및 전류를 측정하기 전압 및 전류 센서, 측정 신호를 필터링하는 저역통과필터 또는 대역통과필터, 상기 전압 및 전류 센서로부터 수집된 데이터를 기반으로 아크고장 여부를 판단하는 제어부를 포함한다. 그리고 제어부는 필터링된 신호를 주파수별로 크기를 측정하고, 직류전압 크기 변화를 측정하여 미리 설정한 임계값을 기반으로 직류 전압 크기 변화 차이에 의한 상태변화를 검출하여 측정된 주파수별 크기 및 검출된 직류전압 크기 변화를 분석하여 아크 고장을 선별 검출한다.



[그림 IV-16] 태양광 발전설비의 직류아크 검출장치 공진필터 बैं크 적용 사례

- ④ 직류 아크고장 검출 장치 및 방법은 다중 임피던스 데이터를 활용함으로써 태양광 및 직류전원 시스템에서의 화재 등의 2차 사고를 사전에 예방하고 직류전원 시스템의 안전성과 신뢰성을 향상시킬 수 있다. 또한, 아크고장 검출 기술은 주파수 대역 분석과 시간 대역 분석을 동시에 수행하여 다양한 아크고장 시나리오에 유연하게 대응할 수 있다. 특히, 공진필터 बैं크를 통해 취득한 다중 주파수 대역의 임피던스 데이터는 아크고장의 특징적 신호를 선택적으로 증폭시켜 검출성능을 향상시킬 수 있다.

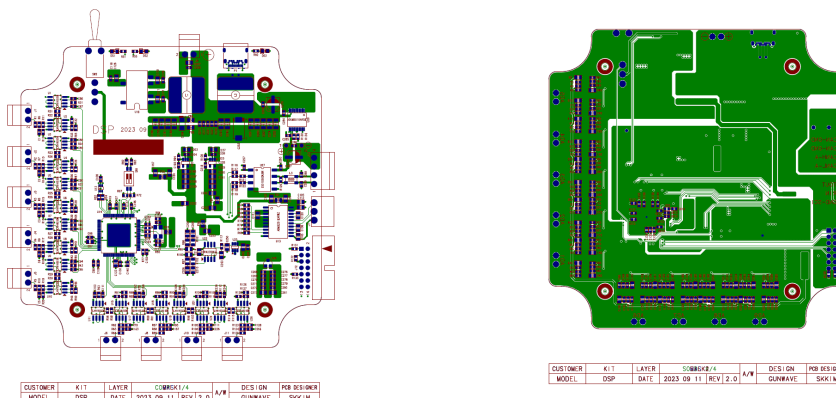
- ⑤ 본 기술은 다음 [그림 IV-17]과 같이 전압 및 전류 감지를 통해 계통의 운영상태를 감지하고, 노이즈 및 아크 구별, 아크고장이 감지되면 계통 보호장치를 동작시켜 전원계통을 보호할 수 있으며, 아크고장 발생을 안전관리자에게 전달하여 직류전원 산업군에서 전력공급 안정성을 확보할 수 있다.



[그림 IV-17] 태양광 발전설비의 직류아크 검출장치 설치 사례

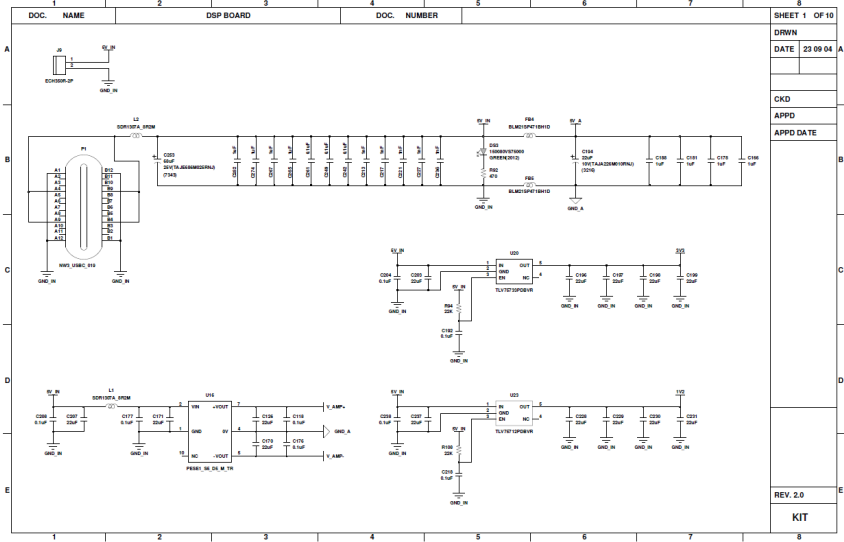
(3) 도면

가) PCB 기판



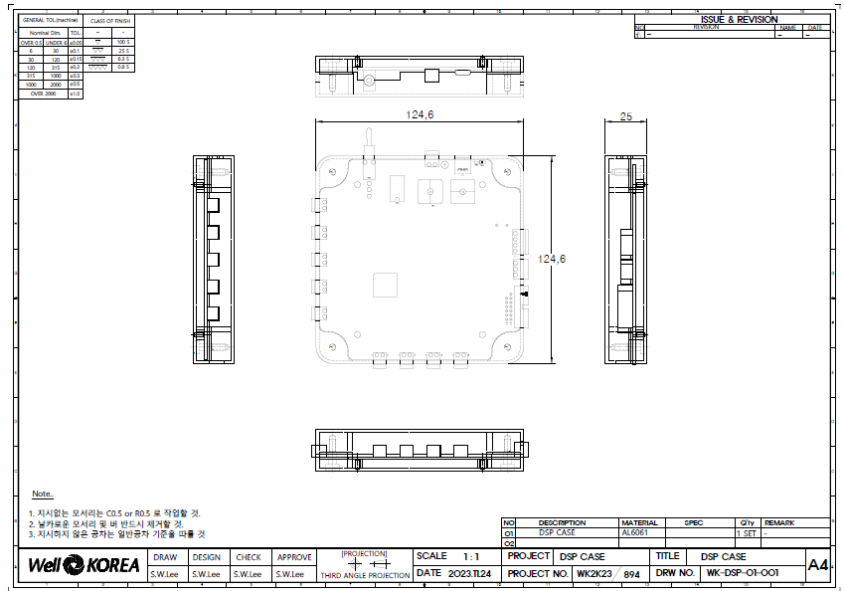
[그림 IV-18] PCB 기판 전면 및 후면

나) 회로도



[그림 IV-19] 회로도 도면

다) 외형도



[그림 IV-20] 외함 도면

(3) 기대효과

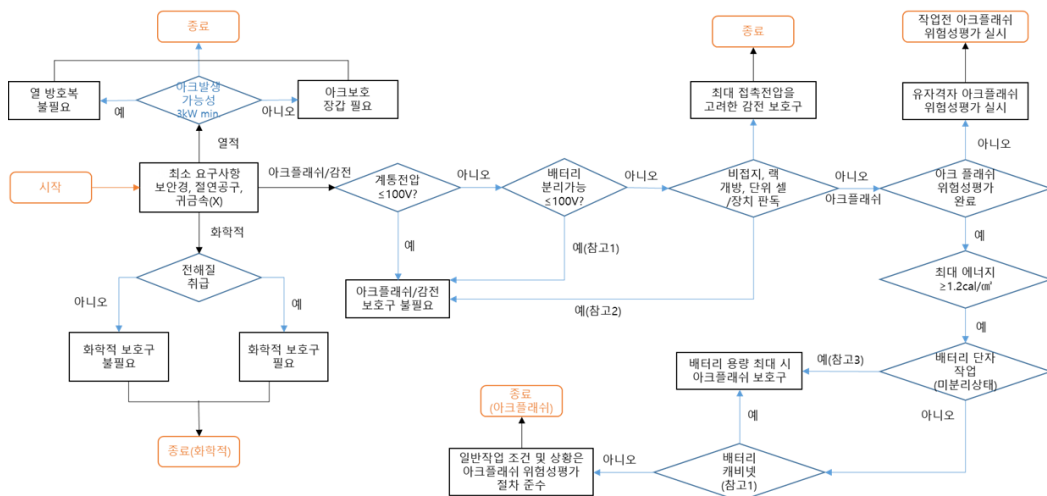
- ① 태양광, 연료전지, 에너지저장장치 및 전기자동차 충전설비 등 직류전원 산업군 직류아크로 인한 전기화재 발생이 증가하고 있으며, 능동적 모니터링 및 선제적 대응을 통해 전기화재 사고 예방에 기여할 수 있다.
- ② KEC 22.3.2 과전류, 지락 및 아크 보호장치에 따르며 옥상·지붕·벽면 등에 설치되는 태양광의 직류전로에 직류아크가 발생하면 이를 검출할 수 있는 장치를 설치하여야 하며 설치 방법 및 성능은 IEC 63027에 따른다. 태양광 발전 시설에 국내 기준에 제정됨에 따라서 태양광 외 직류전원 산업군에 대한 아크로 인한 전기화재 발생 최소화로 산업재해 예방에 기여할 수 있다.
- ③ 또한, 직류 아크고장 검출장치를 직류전원 시스템에 설치함으로써 전기 화재 예방뿐만 아니라 신뢰도 및 정확도가 높은 아크고장 검출을 통해 기계·설비 오동작 최소화로 생산성 제고와 2차 사고 예방에도 기여할 수 있다.

4. 전기사고 예방을 위한 위험성평가 및 안전작업절차

1) 에너지저장장치(ESS) 위험성평가

다음 [그림 IV-21]은 에너지저장장치(ESS)에 대한 위험성평가 관련 방법 및 절차이다.

본 위험성평가에서는 화학적 및 전기적 위험 요인과 함께 아크 플래쉬 등의 위험요인 등을 고려하고 있다. 그리고 위험 요인 대응을 위해 보호구, 보호 수단 및 작업절차 등을 고려하고 있다.

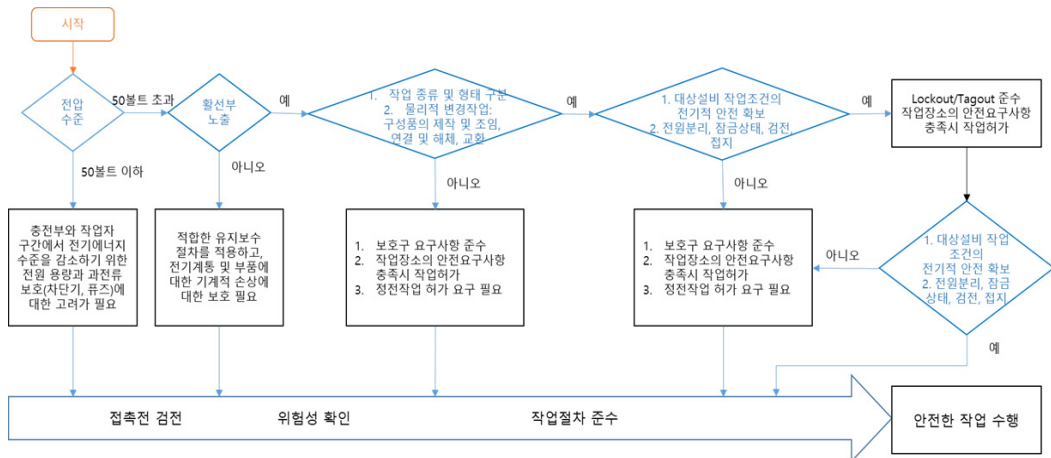


[그림 IV-21] 전기저장장치(ESS) 위험성평가 절차

2) 전기작업 허가 절차

산업안전보건기준에 관한 규칙 제38조(사전조사 및 작업계획서의 작성등) 제5호에 따르면 제318조(전기작업자의 제한)에서 대상 작업으로 규정하는 고

압선 정전작업 및 활선작업에만 작업계획서 작성을 규정하고 있다. 즉, 고압 (1.5천 볼트 초과 7천 볼트 이하의 직류전압 또는 1천 볼트 초과 7천 볼트 이하의 교류전압을 말한다. 이하 같다) 이상의 전로를 취급하는 업무로 정전작업 및 활선작업만 포함된다. 따라서, 30볼트를 초과하는 저압 전기기계·기구 또는 전로를 취급하는 업무의 경우 작업계획서 작성 대상은 아니다. 그러나, 중대재해 원인조사 분석 결과, 감전은 저압에서 약 54%가 발생하고 있어 저압의 경우도 작업계획서 등의 안전조치 사항에 대한 보완이 필요하다. 이에, 전기작업에 대한 안전작업 허가 절차 및 방법을 다음 [그림 IV-22]와 같이 제안한다.



[그림 IV-22] 전기작업 허가 절차

V. 결론



V. 결론

1. 연구 내용 및 결과

1) 연구내용

(1) 감전재해 발생원인 분석을 통한 시사점 도출

고용노동부 산업재해 통계를 활용하여 최근 10년간(2013년~2022년) 발생한 감전 중대재해를 대상으로 조사의견서를 추출하고 감전 매커니즘 기반 분석 모형을 설계하여 감전 중대재해 조사의견서에 대한 항목별 분석을 실시하고 건설과 건설외로 구분하여 비교·분석하였다.

(2) 미래 전기에너지 변화 예측

IEA의 세계 에너지 전망 자료를 기반으로 주요 이슈 및 시나리오, 에너지 수요 전망, 에너지원별 수급 전망을 분석하였다. 또한, IEA의 2050 넷제로 로드맵 자료를 통해 글로벌 에너지 시장의 급격한 변화 추세와 2050 탄소중립 실현을 위한 도전과제 등을 정리하였다. 그리고 미래 전기에너지 변화 관련 우리나라의 정부 정책을 확인하고 미래 방향성을 예측하였다.

(3) 미래 전기에너지 변화 대응을 위한 법·제도 및 기술 개선방안 제시

앞서 실시한 중대재해 원인분석 및 미래 전기에너지 동향 분석을 통해 현재 산업안전보건법에서의 사각지대를 발굴하고 해소를 위한 개선 방안을 제안하였다.

주요 내용으로는 중대재해 원인분석 및 미래 전기에너지 동향 분석 결과를 토대로 현행 산업안전보건기준에 관한 규칙 및 고용노동부 고시에 대한 명확화, 현행화 및 사각지대 해소 등을 통해 산업안전보건법의 현장 작동성을 강화하고자 하였다.

2) 연구결과

(1) 미래 전기에너지 패러다임 변화에 따른 위험 예측

미래의 전기에너지 패러다임은 기존의 중앙 집중식 공급 모델에서 벗어나, 더 효율적이고 지속 가능한 방향으로 급격한 변화가 예상된다. 그리고 이러한 변화는 기술적 혁신, 환경적 요구, 그리고 글로벌 에너지 시장의 변화에 따라 주도될 것이다.

첫 번째, 신재생에너지원 확대와 함께 직류전력 시스템이 기존 교류전력 시스템에 점진적으로 추가되고 있어 안전관리 기술이 부족한 상황이다.

두 번째, 태양광 및 풍력 등 재생에너지원에 설치되는 에너지저장장치(ESS)에 화재사고 발생이 증가하고 있다.

세 번째, 전기자동차 정비 및 유지보수 작업 시 배터리로 인한 아크 플래쉬 위험이 있으며, 안전조치 사항에 대한 법적 근거가 부족한 상황이다.

네 번째, 우리나라 해상풍력의 경우 안전보건 관련 법제도 및 지침 등이 명확하지 않고, 해상풍력 개발사-제조 및 시공업체-운영업체 생애주기별로 어떠한 법률과 안전조치가 적용되어야 하는지에 대한 검토도 부족하다. 또한 부처간 그리고 이해관계자별 이해와 해석도 상이한 상황이다.

마지막으로 중단기적으로 전력수요 증가 및 변동적 재생에너지원 비중 증가에 따라 전력 시스템 불안정, 운영 안정성 확보 및 회복 탄력성 등에 대한 제고가 필요하다.

(2) 감전 중대재해 원인분석 결과를 토대로 법·제도 사각지대 해소

중대재해 조사의견서 분석 및 미래 전기에너지 패러다임 변화 예측 결과와 한국전기설비규정(KEC), 국제표준 등을 고려하여 산업안전보건기준에 관한 규칙, 유해·위험작업의 취업제한에 관한 규칙과 고용노동부 고시에 대한 현행화, 명확화 및 사각지대를 해소하기 위해 개선(안)을 제시하였다.

주요 내용으로는 산업안전보건기준에 관한 규칙에서는 감전 보호구, 작업 계획서, 시스템 비계 조립 작업, 접지 및 누전차단기, 전에서의 전기작업 등에 대한 현행화를 검토하였다. 그리고 안전조치 적용 전압이 법과 기준·규칙과 상이하여 국제표준과 대비하여 현행화하였다. 또한 산업안전보건기준에 관한 규칙의 전기작업자 제한과 유해·위험작업의 취업제한에 관한 규칙의 전기작업 관련 내용에 대한 연계성을 검토하였다. 마지막으로 안전인증·자율안전확인고시 및 안전검사 고시와 한국전기설비규정(KEC)과 비교 검토하고 차이점을 정리하였다.

(3) 직류배전 환경을 대비한 지락차단장치 및 아크고장 검출장치 개발

신재생에너지원 확대에 따라 직류배전 환경을 대비한 직류 전원용 지락차단장치(RCD) 및 아크고장 검출장치를 개발하였다.

먼저 지락차단장치는 산업현장의 기계·설비에서 발생하는 교류, 직류 또는 맥류 성분의 누설전류를 효과적·능동적으로 통제함으로써 태양광, 에너지저장장치(ESS), 전기자동차 충전설비 및 SMPS 내장 기계·설비 등 직류전원 취급·사용에 따른 감전사고를 예방하고, 태양광 발전설비의 직류회로에서의 이중 지락 발생 시 병렬아크에 의한 화재사고도 예방하기 위해 개발하였다.

그리고 아크고장 검출장치는 태양광, 연료전지, 에너지저장장치 및 전기자동차 충전설비 등 직류전원 산업군에서 직류 아크로 인한 전기화재 발생이 증가하고 있으며, 능동적 모니터링 및 선제적 대응을 통해 전기 화재사고를 예방하기 위해 개발하였다.

2. 기대효과 및 활용방안

1) 기대효과

미래환경 및 산업구조 변화에 따라 전기에너지 패러다임도 변화가 진행 중이며, 새로운 형태의 사고 발생형태와 위험요인 발현도 예상할 수 있었다. 따라서 본 연구를 통해 선제적으로 미래 위험요인에 대한 대응 방안을 모색하고, 법·제도 및 기술적 관점에서 중대재해를 예방하기 위한 여러 가지 방안과 수단을 제시하였다는 점에서 현재 정채되고 있는 감전사고 사망 수준의 감소 및 새로운 위험요인에 의한 감전사고 사망 수준의 증가를 억제할 수 있을 것으로 기대한다.

2) 활용방안

연구결과로 도출된 감전 중대재해 원인분석 및 미래 전기에너지 패러다임 변화에 따른 위험 예측 결과는 법·제도 사각지대 해소를 위해 산업안전보건법, 산업안전보건기준에 관한 규칙, 유해·위험작업 취업제한에 관한 규칙 및 고용노동부 고시 제·개정 시 검토 의견을 제시할 예정이다.

그리고 직류배전에 적용이 가능한 전기안전 신기술은 특허출원을 통해 대내·외 공신력을 확보하고 산업현장에 보급하여 적용 예정이다. 단기적으로, 한국전기설비규정(KEC)에서 의무적으로 설치를 규정하고 있는 지락차단장치(RCD)와 아크고장 검출장치를 일체형으로 개발·제작하여 안전성능을 극대화하여 산업현장에 보급 예정이다.

참고문헌

- 한국전기안전공사. 2022년도 전기재해통계분석(제32호). 한국전기안전공사. 2023.
- US DEPARTMENT OF LABOR. BUREAU OF LABOR STATISTICS. NEWS RELEASE(USDL-23-2615). 2023
- 김혜지. 세계 에너지 시장 인사이트, IEA의 세계 에너지 전망(World Energy Outlook 2023). 제23-21호. 에너지경제연구원. 2023.
- IEA. World Energy Outlook. IEA. 2023.
- IEA. Net Zero Roadmap: A Global Pathway to Keep the 1.5 Goal in Reach-2023 Update. IEA. 2023.
- 한국에너지공단. 2022년 신재생에너지 산업통계. 한국에너지공단. 2023.
- Ember. Global Electricity Review 2024. Ember. 2024.
- 산업통상자원부. 분산에너지 활성화 추진전략. 산업통상자원부. 2021.
- 고용노동부. 산업안전보건기준에 관한 규칙. 고용노동부. 2023.
- 이성규. 2024년 세계 에너지안보 위협 요인과 단기 전망. 세계 에너지시장 인사이트 제24-2호. 2024.
- 송형준. 직류 구내 배전 설비 안전성 강화. 한국전기안전공사 블로그. 한국전기 안전공사. 2024

<http://www.keaj.kr/news/articleView.html?idxno=5649>, 미래 전력 계통의
재생에너지 실효성 확보를 위한 장주기 에너지 저장 기술

<https://elecsafety.co.uk/electric-vehicles-and-arc-flash/>, 전기자동차와
아크 플래쉬

<https://www.linkedin.com/pulse/safety-fundamentals-ev-repair-karr>
ep, 전기자동차 수리

UL. Photovoltaic DC Arc-Fault Circuit Protection UL 1699B.
STANDARD FOR SAFETY. 2018.

NFPA. Standards for Electrical Safety in the Workplace. NFPA 70E.
2021.

Abstract

Analysis of Causes of Electrical Accidents in Industrial Sites to respond to Future Changes in Electrical Energy

Objectives : In addition to the increase in renewable energy generation, electric shocks and electrical fires due to short circuits due to aging of existing facilities are continuously occurring, and as new risk factors are expected to emerge due to changes in electrical energy and related facilities, we are analyzing the causes of electrical accidents in the future. We aim to respond effectively to changes in electrical energy. Therefore, through reinterpretation of the cause of occurrence, reclassification of risk factors, and detailing of intervention points in the disaster investigation opinion, we would like to suggest technical and institutional improvement measures that can manage and control new risks resulting from future changes in electric energy to a safe level.

Method : Investigation opinions were extracted for serious electric shock disasters that occurred over the past 10 years (2013 to 2022), an analysis model based on the electric shock mechanism was designed, and the electric shock serious disaster investigation opinions were analyzed by item and analyzed and compared separately for construction and non-construction. In addition, major issues and scenarios related to the world energy outlook, energy demand outlook,

and supply and demand outlook by energy source were analyzed. In addition, the IEA's 2050 Net Zero Roadmap data summarizes the trends of rapid change in the global energy market and the challenges to achieve carbon neutrality by 2050.

Results : Through analysis of the causes of serious accidents and future electric energy trends, blind spots in the current Occupational Safety and Health Act were identified and improvement measures were proposed to resolve them. In other words, based on the results of analysis of the causes of serious disasters and future electric energy trends, the aim was to strengthen the field operability of the Occupational Safety and Health Act by clarifying and implementing the rules and notices regarding the current occupational safety and health standards and eliminating blind spots.

Conclusion : The future electric energy paradigm is expected to see a rapid change away from the existing centralized supply model and toward a more efficient and sustainable direction. And these changes will be driven by technological innovation, environmental demands, and changes in global energy markets. In addition, an improvement plan was presented to update, clarify, and resolve blind spots in the rules on occupational safety and health standards and rules and notices on employment restrictions for hazardous and hazardous work. In addition, we developed a Residual Current Device(RCD) and arc fault detection device for DC power to prepare for the DC distribution environment due to the expansion of new and renewable energy sources. Therefore, through this study, we preemptively sought countermeasures against future risk factors and presented various plans and means to prevent

serious disasters from a legal, institutional, and technical perspective. In that, the number of deaths due to electric shock is currently stagnating. It is expected that the level will be reduced and the occurrence of electric shock accidents caused by new risk factors can be suppressed.

Key words : Future changes, Electrical energy, Causes of electrical accidents

연구진

연구기관 : 산업안전보건연구원

연구책임자 : 변정환 (연구위원, 산업안전연구실)

연구기간

2024. 3. 6. ~ 2024. 11. 30.

본 연구보고서의 내용은 연구책임자의 개인적 견해이며,
우리 연구원의 공식견해와 다를 수도 있음을 알려드립니다.

산업안전보건연구원장

미래 전기에너지 변화 대응을 위한 산업현장의 전기사고 원인분석
(2024-산업안전보건연구원-659)

발행일 : 2024년 12월 31일

발행인 : 산업안전보건연구원 원장 박승현

연구책임자 : 산업안전연구실 연구위원 변정환

발행처 : 안전보건공단 산업안전보건연구원

주소 : (44429) 울산광역시 중구 종가로 400

전화 : 052-703-0843

팩스 : 052-703-0334

Homepage : <http://oshri.kosha.or.kr>

I S B N : 979-11-94453-34-5

공공안심글꼴 : 무료글꼴, 한국출판인회의, Kopub바탕체/돋움체